
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R001 – Elektronické informační a řídicí systémy

Řídicí elektronika pro kalibrační teploměrnou linku

Control electronic for the calibration thermometric line

Bakalářská práce

Autor:

Václav Vokolek

Vedoucí práce:

Ing. Lubomír Slavík

V Liberci 14.5.2008

Originální zadání práce

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří přispěli ke vzniku této práce, především svému vedoucímu Ing. Lubomíru Slavíkovi nejen za jeho otevřenost, trpělivost, ale hlavně za přínosné rady. Dále bych chtěl také poděkovat svým rodičům za jejich psychickou, materiální a finanční podporu.

Václav Vokolek

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh a praktická realizace řídicí elektroniky pro kalibrační teploměrnou linku. V první části je popsána problematika měření tepla, snímačů teploty a vyjadřování nejistot.

Druhá část se věnuje návrhu a samotné realizaci přípravku. Jedná se o 16 autonomních simulátorů průtoku, které obsluha může nastavovat jednak dálkově, jednak místně. Protože byl kladen důraz na zpracování dat v reálném čase byl použit výkonný mikroprocesor firmy Silicon Laboratories.

Firma EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou bude tento přípravek využívat při automatizované kalibraci měřičů tepla. Produkt, který je nazván Kalinka je koncipován s ohledem na snadnou a rychlou manipulaci.

Klíčová slova: teploměrná linka, měření tepla, kalibrace, mikroprocesor

Abstract

The objective of this bachelor dissertation is a design and an implementation the control electronic for the thermometric line. The first section talks about theme of calorimeters, accuracy definition and calibration temperature sensors.

In the second section is described concrete implementation of preparation. There are discussed 16 independent flow meter simulators with remote and local control possibility. They needed a powerful microprocessor since the main emphasis was placed on real time processing. The choosed microprocessor is the one of Silicon Laboratories.

Company EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou will use this preparation in automated heat meters calibration line. The final product called Kalinka is user friendly and fast handling.

Keywords: thermometric line, calorimeter, calibration, microprocessor

Obsah

Poděkování	- 4 -
Abstrakt	- 5 -
Úvod	- 9 -
1 Měření tepla	- 10 -
1.1 Typy přístrojů	- 10 -
1.2 Definice a označení	- 11 -
1.3 Snímače teploty	- 13 -
1.3.1 Všeobecně	- 13 -
1.3.2 Odporové charakteristiky	- 14 -
1.3.3 Snímače teploty pro 2-vodičovou metodu měření	- 14 -
1.3.4 Snímače teploty pro 4-vodičovou metodu měření	- 15 -
1.3.5 Platinový odporový snímač teploty	- 15 -
1.4 Vzorec pro sdílení tepla	- 16 -
2 Kalibrace měřičů tepla	- 18 -
2.1 Metrologické charakteristiky	- 18 -
2.1.1 Všeobecně	- 18 -
2.1.2 Hodnoty největších dovolených chyb	- 18 -
2.1.3 Použití největších dovolených chyb	- 19 -
2.2 Stanovený pracovní rozsah	- 20 -
2.2.1 Rozdíl teplot	- 20 -
2.2.2 Průtok	- 20 -
2.3 Výstup zkušebního signálu	- 20 -
2.4 Zkoušky a měření	- 23 -
2.4.1 Všeobecně	- 23 -
3 Vyjadřování nejistot měření i kalibrací	- 24 -
3.1 Zásady a definice	- 24 -
3.2 Stanovení nejistot měření pro odhady hodnot vstupních veličin	- 25 -
3.2.1 Základní východiska	- 25 -
3.2.2 Stanovení nejistoty typu A	- 25 -
3.2.3 Stanovení nejistoty typu B	- 27 -
3.3 Výpočet standardní nejistoty odhadu hodnoty výstupní veličiny	- 29 -
3.4 Rozšířená nejistota měření	- 31 -
4 Návrh řídicí elektroniky	- 33 -
4.1 Popis návrhu	- 33 -
4.2 Napájecí obvod	- 34 -
4.3 Výstupní moduly	- 35 -

Mikroprocesor	- 36 -
4.3.1 Vlastnosti	- 36 -
4.3.2 Architektura	- 38 -
4.3.3 Ošetření vstupů	- 39 -
4.3.4 Časování a reset mikroprocesoru	- 39 -
4.3.5 JTAG	- 40 -
4.4 Paměť EEPROM	- 41 -
4.5 Popis ovládacích prvků	- 42 -
4.5.1 LCD	- 42 -
4.5.2 Budič sběrnice 74HC245	- 43 -
4.5.3 Klávesnice	- 43 -
4.6 Komunikační modul RS232	- 45 -
4.7 Ostatní obvody	- 46 -
4.7.1 LED diody	- 46 -
4.7.2 Přepínač DIP4	- 46 -
4.7.3 Měřicí body	- 46 -
4.7.4 Propojovací konektory	- 46 -
5 Konstrukce hardwaru	- 47 -
5.1 Tvorba schématu v programu OrCAD Capture CIS	- 47 -
5.2 Tvorba desky plošného spoje v programu OrCAD Layout Plus	- 48 -
5.3 Konstrukce čelního a zadního krycího panelu	- 49 -
5.4 Základní software	- 50 -
Závěr	- 52 -
Seznam tabulek	- 53 -
Seznam obrázků	- 53 -
Seznam odborné literatury	- 55 -
Přílohy	- 58 -
A. Front Panel – schéma a deska plošného spoje	- 58 -
B. Rear Panel – schéma a deska plošného spoje	- 59 -
C. Mainboard – schéma a deska plošného spoje	- 60 -
D. Output modul – schéma a deska plošného spoje	- 63 -
E. Kusovník	- 64 -

Vysvětlivky použitých termínů a zkratk

OrCAD	Elektronický návrhový systém
1 [mil] (mili inch)	Základní jednotka používaná v konstrukční elektronice
DRC	Design Rules Check
SMD	Surface mount device – součástky určené pro povrchovou montáž
DPS	Deska plošného spoje
TOP layer	Vrchní vrstva plošného spoje
BOTTOM layer	Spodní vrstva plošného spoje
Global layer	Zahrnuje všechny vrstvy plošného spoje
SPI	Serial Peripheral Interface – sériové periferní rozhraní
CMOS	Technologie výroby integrovaných obvodů
EEPROM	Elektronicky smazatelná paměť
IO PORT	Vstupně/Výstupní port
MIPS	Milion instructions per sekund
TAP	Test Access Port

Úvod

Rostoucí cena médií vyvolává tlak na měření veličin ovlivňující kvalitu dodávky zákazníkům. Stanovení bilance tepla obsaženého ve vodě nalézá své opodstatnění nejen ve fakturačních měřeních, ale i ve sféře měřicí a regulační techniky pro průmyslovou oblast a laboratorní praxi. Výsledky měření fyzikálních veličin jsou vždy zatíženy chybami, resp. nejistotami, jejichž velikost závisí na metrologických vlastnostech konkrétního snímače.

Firma EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou se zabývá vývojem a výrobou magnetoindukčních průtokoměrů a měřičů tepla. Sortiment snímačů a příslušenství, které nabízí je určen pro vyhodnocování spotřeby tepla, množství protečené kapaliny, či měření okamžitého průtoku do průmyslových nebo domovních aplikací. Firma EESA vlastní úředně schválenou kalibrační metrologickou linku a zajišťuje jak primární, tak i následné metrologické ověření průtokoměrů a měřičů tepla.

1 Měření tepla

Měření předaného nebo absorbovaného tepla patří mezi důležité oblasti měření neelektrických veličin.

1.1 Typy přístrojů

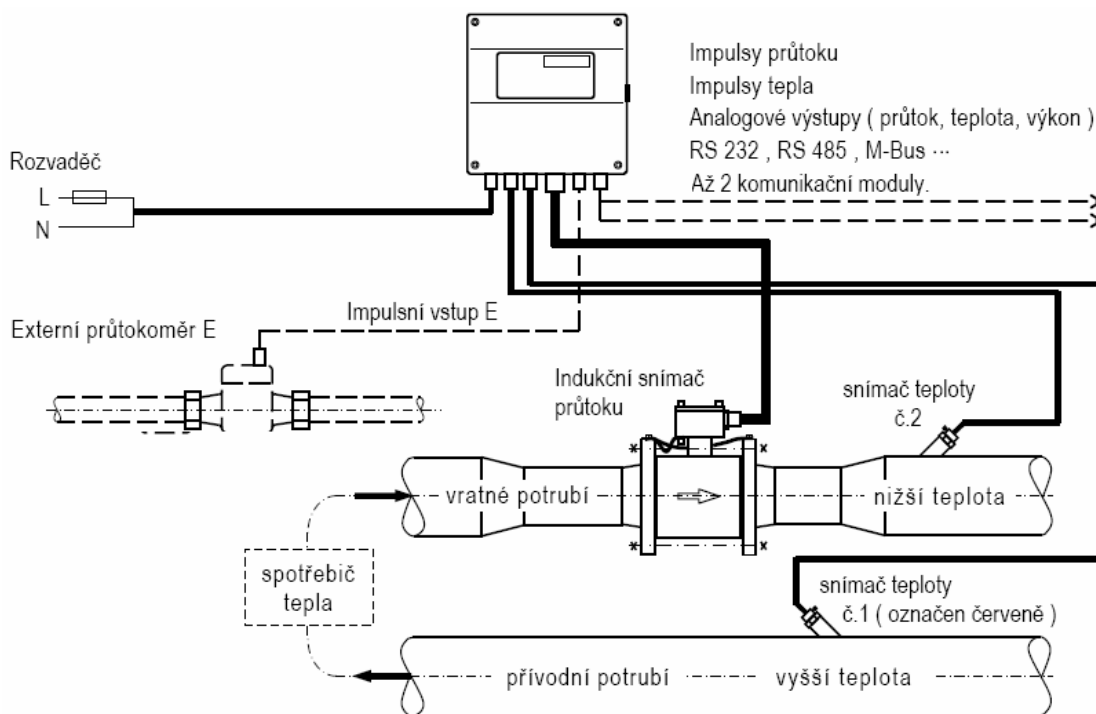
Měřiče tepla rozdělujeme na kompaktní a kombinované:

- a) kompaktní přístroj (complete instrument): měřič tepla, který nemá oddělitelné členy,
- b) kombinovaný přístroj (combined instrument): měřič tepla, který má oddělitelné členy,
- c) hybridní přístroj (často označován jako "kompaktní" přístroj) (hybrid instrument often called a "compact" instrument): měřič tepla, který je možné pro účely schválení typu a ověření považovat za kombinovaný přístroj podle b) po skončení ověření je nutné jednotlivé jeho členy považovat za neoddělitelné.

Členy měřiče tepla, který je kombinovaným přístrojem (sub-assemblies of a heat meter, which is a combined instrument): snímač průtoku, snímače teploty a kalorimetrické počítadlo nebo kombinace těchto prvků

- a) snímač průtoku (flow sensor): člen měřiče tepla, kterým v přívodní nebo vratné větvi teplosměnného zařízení protéká teplonosná kapalina a který vysílá signál, jenž je funkcí objemu nebo hmotnosti, případně průtoku objemového nebo hmotnostního,
- b) snímače teploty (temperature sensor pair): členy měřiče tepla (pro montáž do jímky nebo bez jímky), které snímají teplotu teplonosné kapaliny v přívodní a vratné větvi teplosměnného zařízení, dodávané a používané v párovaných dvojicích,
- c) kalorimetrické počítadlo (calculator): člen měřiče tepla, který přijímá signál ze snímače průtoku a snímačů teploty a vypočítává a indikuje množství předaného tepla.

Zkoušené zařízení (equipment under test – EUT): člen měřiče tepla nebo kompaktní měřič podrobený zkoušce.



Obrázek 1.1: MT500 – Oddělené provedení

1.2 Definice a označení

Pro účely měření tepla a snímačů tepla se používají následující definice a označení.

- **Doba odezvy, $T_{0,5}$** (response time): časový interval mezi okamžikem, kdy je průtok nebo rozdíl teplot vystaven náhlé změně, a okamžikem, kdy odezva dosáhne 50 % hodnoty změny veličiny.
- **Měřič s rychlou odezvou** (fast response meter): měřič pro okruhy, výměny tepla s rychlou dynamickou změnou výměny tepla.
- **Jmenovité napětí, U_n** (rated voltage U_n): napětí vnějšího zdroje napětí potřebné pro činnost měřiče tepla; obvykle se jedná o střídavé napětí síťového zdroje.
- **Pracovní podmínky** (rated operating conditions): podmínky použití které udávají rozsah hodnot ovlivňujících veličin, pro něž jsou metrologické charakteristiky přístroje v mezích stanovených největších dovolených chyb.
- **Referenční podmínky** (reference conditions): soubor specifikovaných hodnot ovlivňujících činitelů, které jsou pevně stanoveny, aby byla zajištěna možnost vzájemného, porovnávání výsledků měření.

- **Ovlivňující veličina** (influence quantity): veličina, která není předmětem měření, ale která ovlivňuje hodnotu měřené veličiny nebo indikaci měřené veličiny měřidlem.
- **Ovlivňující činitele** (influence factors): ovlivňující veličiny, které mají hodnotu v mezích stanovených pracovních podmínek.
- **Rušivý vliv** (disturbance): ovlivňující veličina, která má hodnotu mimo rozsah stanovených pracovních podmínek.
- **Druhy chyb** (types of error)
 - a) **chyba** (indikace) (error (of indication)): indikace měřícího přístroje mínus konvenčně pravá hodnota měřené veličiny,
 - b) **základní chyba** (intrinsic error): chyba měřícího přístroje stanovená za referenčních podmínek,
 - c) **počáteční základní chyba** (initial intrinsic error): chyba měřícího přístroje, která byla stanovena před zkouškami činnosti a před zkouškami spolehlivosti přístroje,
 - d) **chyba stálosti** (durability error): rozdíl mezi chybou měřícího přístroje po určité době jeho používání a jeho počáteční základní chybou,
 - e) **největší dovolená chyba** (maximum permissible error, MPE): nejvyšší dovolené hodnoty chyby (kladné nebo záporné).
- **Druhy funkčních chyb** (types of fault):
 - a) **funkční chyba** (fault): rozdíl mezi chybou indikace měřené veličiny a vlastní chybou daného měřícího přístroje,
 - b) **přechodná chyba** (transitory fault): okamžité odchylky indikace měřené veličiny, které nemohou být interpretovány a uloženy nebo přenášeny,
 - c) **významná chyba** (significant fault): chyba větší než absolutní hodnota největší dovolené chyby, která nepatří mezi chyby přechodné.

POZNÁMKA – Jestliže je hodnota největší dovolené chyby $\pm 2\%$, pak významná chyba je větší než 2% .
- **Referenční hodnoty měřené veličiny** (reference values of the measured, RVM): specifikované hodnoty průtoku, teploty teploměrné kapaliny a rozdílu teplot které jsou pevně stanoveny, aby byla zajištěna možnost platného vzájemného porovnávání výsledků měření.

- **Konvenčně pravá hodnota** (conventional true value): hodnota veličiny, která se pro účely této normy považuje za skutečnou hodnotu.

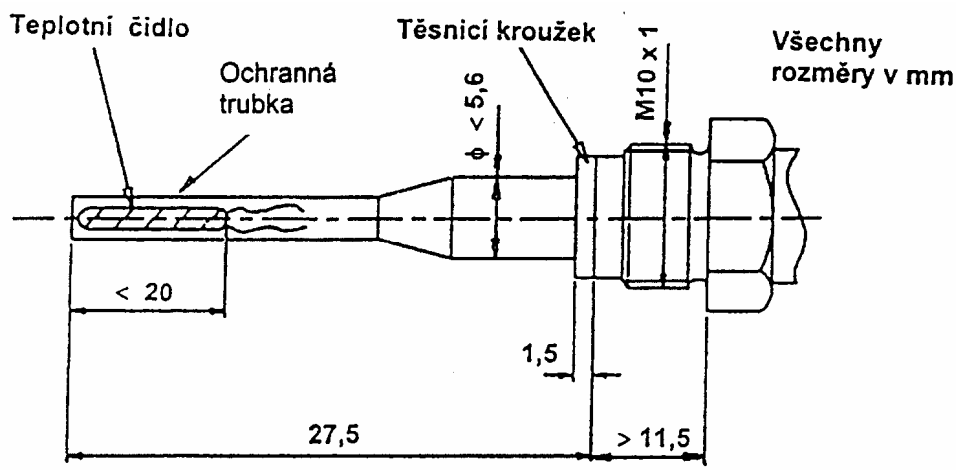
POZNÁMKA – Konvenčně pravá hodnota je obecně považována za hodnotu, která je dostatečně blízko skutečné hodnotě, protože tento rozdíl je pro daný účel nepodstatný.

- **Typ měřiče** (meter model): různé velikosti měřičů tepla nebo jejich členů, které mají z hlediska principu činnosti, konstrukce a materiálů skupinovou podobnost.
- **Elektronické zařízení** (electronic device): zařízení s elektronickými prvky, které vykonává zadané funkce.
- **Elektronický prvek** (electronic element): nejmenší konstrukční prvek elektronického zařízení, který využívá elektronové (děrové) vodivosti v polovodičích nebo elektronové vodivosti v plynech nebo ve vakuu.
- **Minimální ponor snímače teploty** (minimum immersion depth of a temperature sensor): hloubka ponoření v termostatické lázni o teplotě $(80 \pm 5) ^\circ\text{C}$, při teplotě okolního prostředí $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$, kdy při hlubším ponoření se elektrický odpor snímače změní o hodnotu odpovídající teplotě $< 0,1 \text{ K}$.
- **Efekt samoohřevu** (vlastní oteplení) (self heating effect): nárůst signálu odpovídajícího teplotě, který se získá tak, že každé teplotní čidlo páru se vystaví stálému ztrátovému výkonu 5 mW při jeho ponoření do minimální hloubky ponoru ve vodní lázni, která má střední rychlost proudění vody $0,1 \text{ m/s}$.

1.3 Snímače teploty

1.3.1 Všeobecně

Snímače pro snímání rozdílů teplot v přívodním a vratném potrubí musí být platinové odporové snímače teploty vybrané jako párované dvojice. Tam, kde dílčí člen měřiče tepla obsahuje neoddělitelné snímače teploty a kalorimetrické počítadlo, lze použít také jiné druhy snímačů teploty. Dodavatel musí uvést největší dovolený pracovní tlak.



Obrázek 1.2: Snímač teploty – typ DS

1.3.2 Odporové charakteristiky

Ověření snímačů musí probíhat v návaznosti na národní etalony teploty podle ITS-90. Střední hodnoty elektrického odporu snímače teploty měřiče tepla musí být interpolovány pomocí vztahu EN 60751 následujícím způsobem:

$$R_t = R_0(1 + A_t + B_t^2) \quad (1.1),$$

kde:

R_t je hodnota elektrického odporu při teplotě t v Ω ,

R_0 je hodnota elektrického odporu při teplotě 0°C v Ω (základní hodnota),

A $3,9083 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$,

B $-5,775 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2}$.

1.3.3 Snímače teploty pro 2-vodičovou metodu měření

Délka a průřez vodičů spojovacího vedení oddělitelných odporových snímačů teploty musí být totožné. Délka spojovacího vedení, tak jak ji udává výrobce, nesmí být změněna. Délka se musí pohybovat v rozmezí hodnot uvedených viz *Tabulka 1.1*. Maximální délky přívodů pro snímače teploty Pt 100

Tabulka 1.1: Maximální délky přívodů pro snímače teploty Pt 100

Průřez přívodu mm^2	Maximální délka pro Pt 100
0,22	2,5
0,5	5
0,75	7,5
1,5	15

U snímačů s vyššími hodnotami elektrického odporu lze mezní hodnoty úměrně zvýšit.

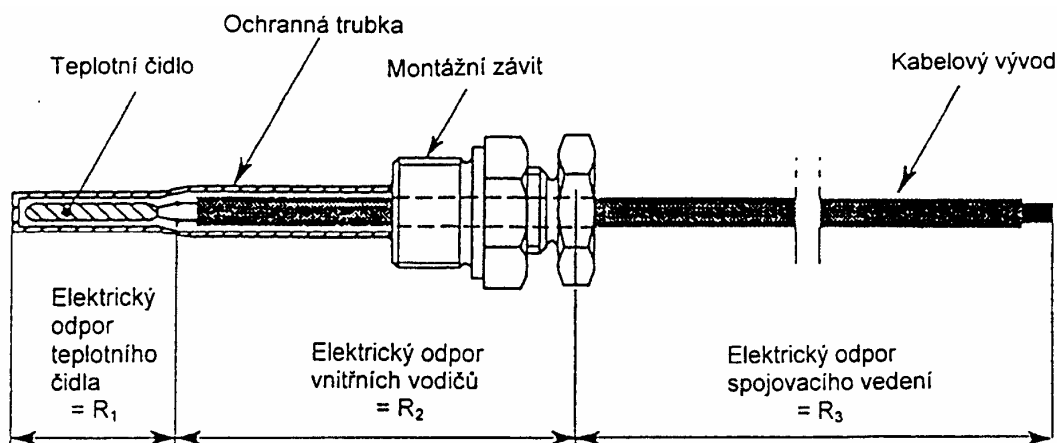
POZNÁMKA – Hodnoty uvedené viz *Tabulka 1.1* byly získány následujícím způsobem:

Předpokládá se, že rozdíl v teplotě těchto přívodů nepřekračuje jednu třetinu teplotního rozdílu mezi přívodním a vratným potrubím. Největší přípustná délka spojovacího vedení pro každý jeho průřez pak byla stanovena dohodou tak, že přídatná chyba nesmí překročit 0,2 násobek největší dovolené odchylky od referenční funkce snímačů teploty s využitím znalosti rozdílných elektrických odporů zapříčiněných rozdíly teplot v přívodním a vratném potrubí. Vliv délky spojovacího vedení je možné zanedbat, jestliže celkový elektrický odpor přívodů snímače teploty $Pt\ 100$ nepřekročí dvakrát $0,2\ \Omega$.

1.3.4 Snímače teploty pro 4-vodičovou metodu měření

Jestliže požadavky na délku kabelu stanovené viz *Tabulka 1.1* nemohou být splněny, pak je třeba použít čtyřvodičové připojení snímačů teploty. Spoje musí být jasně identifikovatelné tak, aby nemohlo dojít k jejich záměně. Pro snímače teploty s hlavicí se doporučuje průřez vodičů $0,5\ \text{mm}^2$ a pro snímače teploty s kabelovým vývodem pak minimální průřez $0,14\ \text{mm}^2$.

1.3.5 Platinový odporový snímač teploty



Obrázek 1.3: Snímač teploty s kabelovým přívodem

Celkový elektrický odpor obvodu teploměru: $R_c = R_1 + R_2 + R_3$

Elektrický odpor snímače teploty: $R = R_1 + R_2$

Výrobce specifikovaný elektrický odpor spojovacího vedení: R_3

Ve všech výpočtech se používá elektrický odpor snímače teploty: R

POZNÁMKA – Pokud se použije čtyřvodičové připojení snímačů teploty, pak znalost hodnoty elektrického odporu spojovacího vedení není potřebná.

1.4 Vzorec pro sdílení tepla

Teplo předané tělesu nebo z nějakého tělesa odebrané lze určit ze znalosti jeho hmotnosti, měrné tepelné kapacity a změny teploty. V měřiči tepla se rozsah změny entalpie mezi přívodní a vratnou větví teplosměnného zařízení stanoví pomocí časové integrace. Pro tento děj platí následující rovnice:

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} q_m \Delta h \, dt \quad (1.2),$$

kde:

Q je množství tepla předaného nebo absorbovaného,

q_m hmotnostní průtok kapaliny přenášející energii, která daným měřičem tepla protéká,

Δh rozdíl mezi měrnými entalpiemi kapaliny přenášející energii při teplotách teplonosné kapaliny v přívodní a vratné větvi teplosměnného zařízení,

t čas.

Jestliže měřidlo určuje objem místo hmotnosti, pak platí následující rovnice:

$$Q = \int_{V_0}^{V_1} K \Delta \Theta \, dV \quad (1.3),$$

kde:

Q je množství tepla předaného nebo absorbovaného,

V je objem protékající kapaliny,

K je tepelný součinitel, který je funkcí vlastností teplonosné kapaliny při odpovídajících teplotách a tlaku,

$\Delta\Theta$ je rozdíl teplot teplonosné kapaliny mezi přívodem a vratnou větví teplosměnného zařízení.

U měřičů tepla, které jsou určeny pro použití s teplonosnou kapalinou jinou než voda, musí dodavatel uvést hodnotu použitého tepelného součinitele jako funkci teploty a tlaku.

POZNÁMKA – Tabulky hodnot tepelného součinitele teplonosných kapalin jiných než voda lze najít [1].

2 Kalibrace měřičů tepla

Již od pradávna se obecně používaná měřidla porovnávala (kalibrovala) s měřidly přesnějšími (nebo tzv. zaručeně správnými), jejichž původní název vzorové měřidlo se později změnil na etalon. Etalon musel být desetkrát přesnější než kalibrované měřidlo. Porovnával se s etalonem zase desetkrát větší přesnosti – tedy o řád přesnějším. Tím vznikly řady etalonů. Se vzrůstající potřebou měřit a s narůstajícím počtem měřidel bylo nutné zpravidla zavést několik řádů etalonů s hierarchicky rostoucí přesností. Každá laboratoř měla své etalony, které se porovnávaly s etalony krajských či okresních laboratoří, ty se zemskými atd. Tak vznikl nepřerušovaný řetězec etalonů zjišťujících tzv. návaznost měření.

2.1 Metrologické charakteristiky

2.1.1 Všeobecně

- Snímače průtoku měřičů tepla a kompaktní měřice tepla se řadí do tří tříd přesnosti: třída 1, třída 2 a třída 3.
- Největší dovolené chyby měřičů tepla, kladné nebo záporné, ve vztahu ke konvenčně pravé hodnotě tepla, jsou vyjádřeny jako relativní chyby, které se mění jako funkce rozdílu teplot a průtoku.
- Největší dovolené chyby jednotlivých členů měřice tepla, kladné nebo záporné, se vypočítají v případě použití kalorimetrického počítadla a snímačů teploty z rozdílu teplot a v případě snímače průtoku z daného průtoku.
- Relativní chyba E je vyjádřena vztahem:

$$E = \frac{V_d - V_c}{V_c} 100\% \quad (2.1),$$

kde:

V_d je indikovaná hodnota,

V_c je konvenčně pravá hodnota.

2.1.2 Hodnoty největších dovolených chyb

Největší dovolené relativní chyby kompaktního měřice tepla

Třída 1: $E = \text{viz poznámka}$

Třída 2: $E = \pm (3 + 4 \Delta\Theta_{\min} / \Delta\Theta + 0,02 q_p/q)$

Třída 3: $E = \pm (4 + 4 \Delta\Theta_{\min} / \Delta\Theta + 0,05 q_p/q)$

Největší dovolené relativní chyby členů měřiče tepla

a) Kalorimetrické počítadlo:

$$E_c = \pm(0,5 + \Delta\Theta_{min} / \Delta\Theta),$$

kde chyba E_c vyjadřuje vztah mezi indikovanou a konvenčně pravou hodnotou tepla.

b) Snímač teploty:

$$E_t = \pm(0,5 + 3 \Delta\Theta_{min} / \Delta\Theta),$$

kde chyba E_t vyjadřuje vztah mezi indikovanou a konvenčně pravou hodnotou, který vyplývá ze vztahu mezi rozdílem údajů snímačů teploty a rozdílem teplot. Vztah mezi teplotou a elektrickým odporem každého jednotlivého snímače z dané dvojice se nesmí lišit od hodnot vyplývajících ze vztahu uvedeného v EN 60751 (použitím standardních hodnot konstant A , B a C) o více než o hodnotu, která odpovídá 2 K.

c) Snímač průtoku:

Třída 1: $E_f = \text{viz poznámka.}$

Třída 2: $E_f = \pm(2 + 0,02 q_p/q)$, ale ne více než $\pm 5 \%$

Třída 3: $E_f = \pm(3 + 0,05 q_p/q)$, ale ne více než $\pm 5 \%$

kde chyba E_f vyjadřuje vztah mezi indikovanou hodnotou tepla a konvenčně pravou hodnotou s uvažováním vztahu mezi výstupním signálem snímače průtoku a hmotností nebo objemem.

POZNÁMKA – E a E_f pro třídu 1 je třeba definovat tehdy, jestliže to modernizace zkušebních postupů a snímače průtoku umožňují.

Jsou definovány tyto hodnoty:

Pro kompaktní měřiče: $E = \pm(2 + 4 \Delta\Theta_{min} / \Delta\Theta + 0,01 q_p/q)$

Pro snímače průtoku: $E_f = \pm(1 + 0,01 q_p/q)$, ale ne větší než $\pm 5 \%$.

Předpokládá se, že tyto největší dovolené chyby by bylo možné použít pro měřiče tepla se snímači průtoku o $q_p \geq 100 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.1.3 Použití největších dovolených chyb

- Pro kombinace členů měřiče tepla definované v 1.1 je největší dovolená chyba dané kombinace rovna aritmetickému součtu největších dovolených chyb jednotlivých členů.

- Chyby kombinovaných měřičů tepla nesmí být větší než součet největších dovolených chyb jeho členů uvedených v 2.1.2.
- Dodavatel kombinovaných měřičů může dohodnout, že pro použití největších dovolených chyb se dané zařízení považuje za kompaktní měřidlo.

2.2 Stanovený pracovní rozsah

Parametry měřiče tepla jsou omezeny mezními hodnotami teplotního rozsahu, rozdílu teplot, tepelného výkonu a průtoky (q_s a q_i). Jestliže je měření tepla ovlivněno tlakem teplotnosné kapaliny pak musí být tlak považován za parametr.

2.2.1 Rozdíl teplot

Podíl horní a dolní meze rozdílu nesmí být menší než 10. Dolní mez musí být dodavatelem nastavena na jednu z následujících hodnot 1, 2, 3, 5 nebo 10 K. Nejvhodnější hodnota je 3 K.

2.2.2 Průtok

Podíl jmenovitého průtoku a dolní meze průtoku (q_p/q_i) musí být 10, 25, 50, 100 nebo 250

2.3 Výstup zkušebního signálu

Pro účely zkoušení se vyžaduje, aby byly pomocí převodníku dodány impulsy s vysokým rozlišením (*viz Tabulka 2.2*) nebo aby byla pomocí převodníku (pokud bude třeba) použita data ze sériového rozhraní, jak je popsáno v EN 1434-3. Rozlišovací schopnost tohoto zkušebního výstupu musí být taková, aby při zkoušení při q_i definovaném v 5.3 *EN 1434-1:1997* nebyla chyba měření vyplývající z počtu impulsů větší než 0,8 % a aby nebyla překročena doba zkoušení – 1 h pro průtoky $q_p \leq 10 \text{ m}^3/\text{h}$ nebo 1,5 h pro $q_p \geq 10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Jmenovitý vztah mezi vyslaným signálem a měřenou veličinou musí být dodavatelem uveden. Názvy výstupů používaných u spojů impulsních výstupů jsou uvedeny *viz Tabulka 2.1*.

Tabulka 2.1: Vstupní a výstupní signály pro zkoušené zařízení

ID signálu	Popis signálu		Funkce
<u>+U</u>	Vstup	Kladné zdrojové napětí	Zdroj pro převodník
<u>-U</u>	Vstup	Záporné zdrojové napětí	Reference pro všechny signály
<u>UR</u>	Výstup	Referenční hladina	Hladina logického napětí zdroje zkoušeného zařízení
Pro snímač průtoku			
FH	Výstup	Objemové impulsy s vysokým rozlišením	Zkušební výstup snímače průtoku
FO	Výstup	Objemový výstupní signál	Například z kontaktního mechanismu
Pro kalorimetrické počítadlo			
CH	Výstup	Energetické impulsy s vysokým rozlišením	Zkušební výstup z kalorimetrického počítadla
CE	Výstup	Impulsy čítače energie	Například z čítače energie
CV	Výstup	Impulsy čítače objemu	Například z čítače objemu
CI*)	Vstup	Spouštěcí signál pro výpočetní cyklus	Simulované impulsy z kontaktního mechanismu
CT*)	Vstup	Zkušební vstup pro objemově úměrné impulsy	Simulované impulsy např. FH ze snímače průtoku
CS	Výstup	Stavový signál	Aktivní = měření vchodu

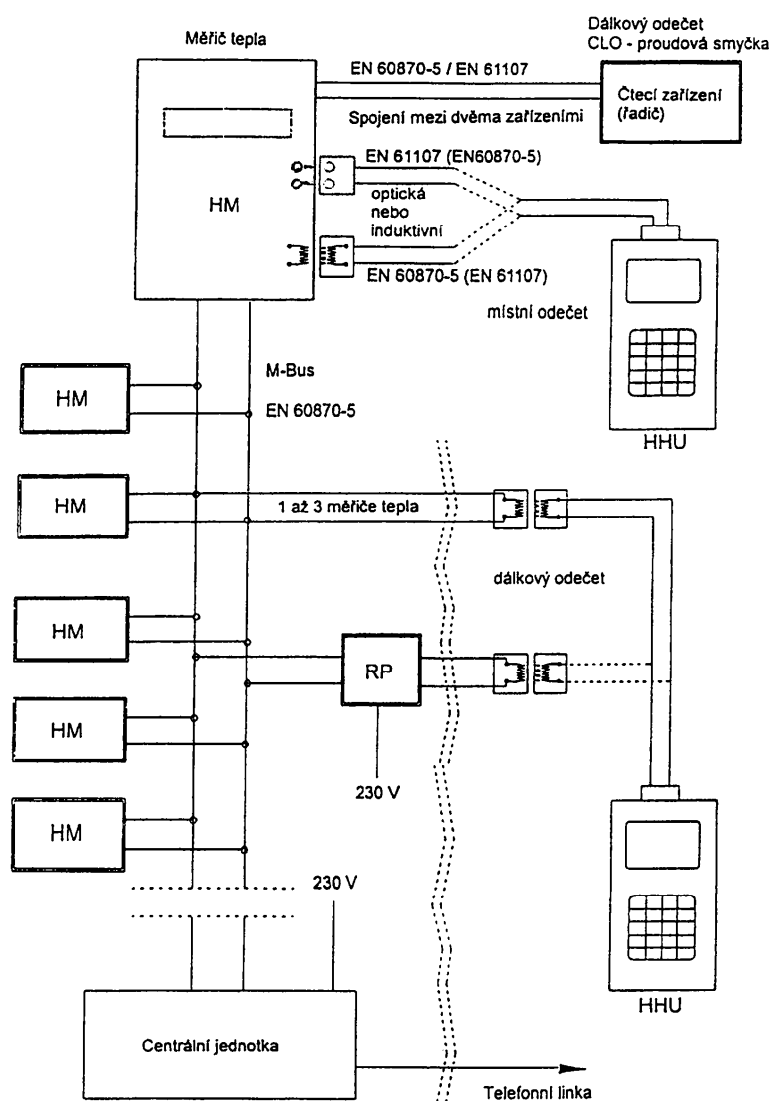
_ Podtržené signály jsou povinné

*) K dispozici bude pouze jeden ze signálů CI a CT

Tabulka 2.2: Elektrické a mechanické specifikace pro normalizované zkušební zařízení

Signál ID	Číslo kontaktu převodníku	Elektrická specifikace	Poznámky
+U	7 + 8	$(8 \pm 0,5) \text{ V}$ - maximální	Zdroj pro převodník
-U	1 + 2		
UR	6	$1 < UR < 12 \text{ V}$ – maximální zátěž 0,1 mA	
FH	3	$f \leq 10 \text{ kHz}$ TH $\geq 50 \text{ ms}$	f: kmitočet v Hz
FO	4	$f \leq 5 \text{ Hz}$ TH $\geq 1 \text{ ms}$	TH: doba na vysoké úrovni v s
CH	15	$f \leq 2 \text{ MHz}$ TH $\geq 200 \text{ ns}$	
CE	11	TH $\geq 30 \text{ ms}$	
CV	12	TH $\geq 30 \text{ ms}$	
CI	13	$f \leq 1 \text{ Hz}$ TH/TL = $1 \pm 0,1$	TL: doba na nízké úrovni v s
CT	14	$f \leq 10 \text{ kHz}$ TH/TL = $1 \pm 0,1$	
CS	10	$f \leq 5 \text{ Hz}$ TH $\geq 1 \text{ ms}$	

- Všechny signály musí být CMOS s hladinami vyššími než $0,6U_R$ jako logická „1“ a nižší než $0,4 U_R$ jako logická „0“.
- Všechny vstupy na zkušebním zařízení musí mít impedanci $100\text{ k}\Omega$ nebo vyšší.
- Všechny výstupy na zkušebním zařízení musí snést zatížení $10\text{ k}\Omega$
- Konektor z převodníku do zkušebního zařízení musí být 15 kolíkový Sub-D konektor podle ISO 4903.



Obrázek 2.1: Komunikační propojení měřiče tepla

2.4 Zkoušky a měření

2.4.1 Všeobecně

Pokud není ve specifikaci zkoušky stanoveno jinak, používají se požadavky zkoušky bez ohledu na třídu prostředí daného měřiče tepla.

Všechna měření musí být provedena za daných instalačních podmínek (na příklad přímé části potrubí před a za měřičem), které jsou pro daný typ měřiče tepla stanoveny dodavatelem. Pokud není stanoveno jinak, pak teplonosnou kapalinou pro všechny zkoušky musí být voda.

Jestliže může být snímač teploty umístěn ve snímači průtoku, pak provozní zkoušky snímače průtoku musí být provedeny se snímačem teploty. Jestliže nedílnou částí snímače průtoku je filtr nebo síto, musí být tyto zahrnuty do všech zkoušek.

Jestliže zjištěná chyba leží mimo rozsah největších dovolených chyb, pak musí být daná zkouška dvakrát zopakována, pokud není uvedeno jinak. Daná zkouška se pak považuje za vyhovující, jestliže obě hodnoty:

- aritmetický průměr výsledků těchto tří zkoušek
- alespoň dva z výsledků zkoušek leží uvnitř intervalu největších dovolených chyb nebo na jeho hranici.

3 Vyjadřování nejistot měření i kalibrací

3.1 Zásady a definice

Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině.

Jako měřené veličiny jsou označovány ty blíže určené veličiny, které jsou předmětem měření. Při kalibracích se obvykle pracuje pouze s jednou měřenou veličinou, resp. jednou výstupní veličinou Y závislou na určitém počtu vstupních veličin X_i ($i=1, 2, \dots, N$) dle funkční závislosti:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.1)$$

Funkce f reprezentuje postup měření a metodu stanovení a popisuje, jak jsou hodnoty výstupní veličiny Y stanovovány z hodnot vstupních veličin X_i . Množinu vstupních veličin X_i lze rozdělit do dvou základních kategorií dle způsobu jakým byla stanovena jejich hodnota a nejistota s touto hodnotou spojená:

- a) veličiny, u nichž byl odhad a s ním spojená nejistota přímo stanoven na základě provedení měření. Tyto hodnoty mohou být stanoveny např. na základě jednoho pozorování (měření), opakovaného pozorování nebo odborného úsudku na základě zkušenosti. Dále mohou zahrnovat jak korekce na odečítání přístroje, tak korekce na ovlivňující veličiny jako jsou teplota prostředí, atmosférický tlak nebo vlhkost
- b) veličiny, u nichž byl pro dané měření odhad hodnoty a s ním spojená nejistota převzat z externích zdrojů, jako je tomu v případě veličin vztahujících se ke kalibrovaným měřicím etalonům, certifikovaným referenčním materiálům nebo referenčním údajům převzatým z příruček.

Odhad hodnoty měřené veličiny Y , tj. odhad hodnoty výstupní veličiny označený jako y , se stanoví dosazením odhadů x_i za hodnoty vstupních veličin X_i ($i=1, 2, \dots, N$)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3.2)$$

Zároveň se předpokládá, že odhady hodnot vstupních veličin jsou nejlepšími odhady, které byly korigovány o všechny vlivy významné pro model měření. Pokud tomu tak

není, musí se do modelu zavést nezbytné korekce v podobě samostatných vstupních veličin.

Pro vyjádření míry rozptýlení hodnot náhodné veličiny se používá rozptyl jejího rozdělení hodnot, resp. jeho kladná druhá odmocnina, označovaná jako směrodatná odchylka. Standardní nejistotou měření $u(y)$, vztahující se k odhadu hodnoty výsledné veličiny nebo výsledku měření y , je směrodatná odchylka měřené veličiny Y . Tato hodnota se stanoví z odhadů x_i hodnot vstupních veličin X_i a jim příslušejících nejistot $u(x_i)$. Standardní nejistota náležící určitému odhadu hodnoty veličiny má stejný rozměr jako tento odhad. V některých případech může být vhodné vyjadřovat nejistotu jako relativní nejistotu měření, což je standardní nejistota měření vztahující se k odhadu hodnoty příslušné veličiny dělená absolutní hodnotou tohoto odhadu. Vzhledem k tomuto způsobu stanovení je relativní nejistota měření bezrozměrnou veličinou. Tento způsob vyjádření však nelze použít v případech, kdy je odhad hodnoty určité veličiny roven nule.

3.2 Stanovení nejistot měření pro odhady hodnot vstupních veličin

3.2.1 Základní východiska

Nejistota měření vztahující se k odhadu hodnot vstupních veličin se stanoví buď postupem pro stanovení nejistoty typu A nebo postupem pro stanovení nejistoty typu B. Postup pro stanovení nejistoty typu A je založen na stanovení nejistoty statistickou analýzou série pozorování. V tomto případě je standardní nejistota výběrovou směrodatnou odchylkou průměru vycházející z výpočtu nebo příslušné regresní analýzy. Postup pro stanovení standardní nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty jiným způsobem než statistickým vyhodnocením série pozorování. V tomto případě vychází stanovení standardní nejistoty z nějaké jiné odborné znalosti. POZNÁMKA – V některých případech (se kterými se lze při kalibracích setkat zřídka) leží všechny možné hodnoty určité veličiny na jedné straně od určité mezní hodnoty. Známým případem je tzv. "kosinová chyba".

3.2.2 Stanovení nejistoty typu A

Postup pro stanovení nejistoty typu A lze použít tehdy, pokud bylo za stejných podmínek provedeno několik nezávislých pozorování vstupních veličin. Pokud je měření prováděno s dostatečným rozlišením, bude pozorovatelné rozptýlení získaných hodnot.

Označme opakovaně měřenou vstupní veličinu X_i jako veličinu Q . Odhad q hodnoty veličiny Q , na základě n statisticky nezávislých pozorování ($n > 1$), je dán aritmetickým průměrem individuálních napozorovaných hodnot $q_j (j=1, 2, \dots, n)$

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (3.3)$$

Nejistota měření spojená s odhadem q se stanoví jedním z následujících postupů:

- a) Odhad rozptylu pravděpodobnostního rozdělení hodnot je výběrový rozptyl $s^2(q)$ hodnot q_j , který je stanoven dle vztahu:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum (q_j - \bar{q})^2 \quad (3.4)$$

Kladná odmocnina takto stanoveného rozptylu je označována jako výběrová směrodatná odchylka. Nejlepší odhad rozptylu aritmetického průměru q je výběrový rozptyl aritmetického průměru stanovený dle vztahu:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (3.5)$$

Jeho (kladná) druhá odmocnina je pak označována jako výběrová směrodatná odchylka průměru. Standardní nejistota $u(q)$ odhadu q je pak rovna výše uvedené experimentální směrodatné odchylce průměru:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (3.6)$$

Obecně platí, že pokud je počet opakovaných měření n malý ($n < 10$), musí být zvážena spolehlivost odhadu standardní nejistoty typu a stanovené dle vztahu $u(\bar{q}) = s(\bar{q})$. Pokud nemůže být počet pozorování zvýšen, je třeba pro stanovení standardní nejistoty zvážit použití jiných možností.

- b) Pro měření, která jsou dobře popsána a statisticky vyhodnocována, může být k dispozici odhad rozptylu s^2_p z velkého počtu měření lépe charakterizující rozptýlení hodnot než odhad standardní odchylky stanovený z omezeného počtu pozorování. Pokud je v takovémto případě hodnota vstupní veličiny Q určena jako aritmetický průměr q malého počtu n nezávislých pozorování, lze odhad rozptylu aritmetického průměru stanovit dle vztahu:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n} \quad (3.7)$$

Standardní nejistota je pak z této hodnoty odvozena dle vztahu (3.6)

3.2.3 Stanovení nejistoty typu B

Postup pro stanovení standardní nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty vztahující se k odhadu x_i vstupní veličiny X_i jiným způsobem než statistickou analýzou série pozorování. Příslušná standardní nejistota $u(x_i)$ je určena odborným úsudkem na základě všech dostupných informací o možné variabilitě veličiny X_i . Nejistoty náležící do této kategorie mohou být odvozeny na základě:

- údajů z dříve provedených měření,
- zkušenosti s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a zařízení nebo jejich obecné znalosti,
- údajů výrobce,
- údajů uváděných v kalibračních listech nebo jiných certifikátech,
- nejistot referenčních údajů převzatých z příruček.

Náležité použití všech relevantních informací pro stanovení nejistoty typu B vyžaduje důkladné pochopení problematiky vycházející ze zkušenosti a obecné znalosti. Jedná se tedy o odbornost, které lze dosáhnout praxí. Správné použití postupu pro stanovení standardní nejistoty typu B může vést k hodnotě nejistoty stejné spolehlivé jako v případě užití postupu pro stanovení nejistoty typu A, a to zejména v případech, kdy je nejistota typu a stanovena z relativní malého počtu statisticky nezávislých pozorování. Musí být rozlišovány následující případy:

- a) Pokud je pro veličinu X_i známá pouze jedna hodnota, jako např. jedna naměřená hodnota, výsledná hodnota z předchozích měření, referenční hodnota z literatury nebo korekční hodnota, použije se tato hodnota za odhad x_i . Standardní nejistota $u(x_i)$ náležící k této hodnotě musí být převzata ze stejného zdroje. Není-li to možné, musí být nejistota spočtena z důvěryhodných údajů. Pokud data tohoto charakteru nejsou k dispozici, musí být nejistota odhadnuta na základě zkušenosti.
- b) Pokud lze na základě teorie nebo zkušenosti předpokládat pro veličinu X_i určité pravděpodobnostní rozdělení, je třeba použít za odhad x_i příslušnou očekávanou

hodnotu a za příslušnou standardní nejistotu $u(x_i)$ odmocninu rozptylu tohoto rozdělení.

- c) Pokud lze pro hodnoty veličiny X_i odhadnout pouze horní a dolní limit a_+ a a_- (např. údaj výrobce pro měřicí zařízení, rozmezí teplot, zaokrouhlovací chyby nebo chyby vznikající zkracováním při automatické redukci dat), je třeba použít pro popis její variability rovnoměrného rozdělení. Dle výše uvedeného případu b) to vede na vztah:

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (3.8)$$

Pro odhad hodnoty a na vztah:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ + a_-)^2 \quad (3.9),$$

pro druhou mocninu standardní nejistoty. Pokud rozdíl mezi limitními hodnotami označíme jako $2a$, lze vztah (3.9) upravit na tvar:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2 \quad (3.10)$$

Použití rovnoměrného rozdělení představuje přiměřené statistické vyjádření nedostatečné znalosti vstupní veličiny X_i , pokud o ní nejsou známy jiné informace, než jsou limity její variability. Pokud ale víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu intervalu hodnot je vyšší než pravděpodobnost výskytu hodnot v krajích intervalu, může být vhodnější použití trojúhelníkového nebo normálního rozdělení. Naopak, pokud je výskyt hodnot v krajích intervalu pravděpodobnější než ve středu intervalu, může být vhodnější použití U rozdělení.

3.3 Výpočet standardní nejistoty odhadu hodnoty výstupní veličiny

Pro nekorelované vstupní veličiny je druhá mocnina standardní nejistoty odhadu y hodnoty výstupní veličiny definována vztahem:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (3.11)$$

V některých případech, které se při kalibraci objevují zřídka, kdy funkce f je silně nelineární nebo některé z koeficientů citlivosti jsou nulové, je nutné do tohoto vztahu zahrnout i členy vyšších řádů.

Veličina $u_i(y)$ ($i=1, 2, \dots, N$) je příspěvkem ke standardní nejistoty odhadu y výstupní veličiny vyplývající ze standardní nejistoty odhadu x_i vstupní veličiny:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (3.12),$$

kde c_i je koeficient citlivosti odpovídající odhadu hodnoty x_i vstupní veličiny, tj. hodnota parciální derivace funkce f dle vstupní veličiny X_i pro odhad její hodnoty x_i :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N} \quad (3.13)$$

Koeficient citlivosti c_i popisuje, do jaké míry je odhad výstupní hodnoty y ovlivňován změnami v odhadu x_i vstupní veličiny X_i . Jeho hodnota může být stanovena z rovnice funkce f dle vztahu výše nebo pomocí numerických metod, tj. výpočtem změny hodnoty odhadu y výstupní veličiny vzhledem ke změně odhadu x_i vstupní veličiny v rozmezí $+u(x_i)$ a $-u(x_i)$. Jako hodnota koeficientu c_i se vezme výsledná změna v hodnotě y dělená $2u(x_i)$. V některých případech může být vhodnější nalézt změnu hodnoty y experimentálním opakováním měření např. v rozsahu $x_i \pm u(x_i)$.

I když je $u(x_i)$ vždy kladné, příspěvek $u_i(y)$ dle vztahu (3.12) může být podle znaménka koeficientu citlivosti c_i kladný nebo záporný. Znaménko $u_i(y)$ je třeba vzít v úvahu v případě korelovaných vstupních veličin.

Pokud je funkce f definována jako součet nebo rozdíl vstupních veličin X_i :

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i \quad (3.14),$$

je odhad hodnoty výstupní veličiny (viz vztah $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$) dán součtem či rozdílem odpovídajících odhadů hodnot vstupních veličin:

$$y = \sum_{i=1}^N p_i x_i \quad (3.15),$$

protože hodnoty koeficientů citlivosti jsou rovny p_i a vztah (3.11) přechází na tvar:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(x_i) \quad (3.16)$$

Pokud je funkce f definována jako součin nebo podíl vstupních veličin X_i

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod X_i^{p_i} \quad (3.17)$$

Je odhad výstupní veličiny dán součinem či podílem odhadů hodnot veličin:

$$y = c \prod x_i^{p_i} \quad (3.18)$$

V tomto případě jsou koeficienty citlivosti rovny $p_i y/x_i$ a pokud jsou použity relativní standardní nejistoty $w(y) = u(y)/|y|$ a $w(x_i) = u(x_i)/|x_i|$ je možné ze vztahu (3.11) odvodit vztah analogický vztahu (6):

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i) \quad (3.19)$$

Pokud jsou dvě vstupní veličiny X_i a X_k korelované, tj. jestliže jsou na sobě určitým způsobem závislé, musí se jako jeden z příspěvků k nejistotě uvažovat i jejich kovariance. Schopnost vzít do úvahy výše uvedený vliv korelací závisí na znalostech průběhu měření a odhadu vzájemné závislosti vstupních veličin. Obecně je nutné respektovat fakt, že zanedbání vzájemných závislostí mezi vstupními veličinami může vést k nesprávnému stanovení standardní nejistoty výsledku měření.

Kovariance odpovídající odhadům dvou vstupních veličin X_i a X_k může být považována za nulovou nebo zanedbána v případech, kdy:

- a) vstupní veličiny X_i a X_k jsou nezávislé, např. proto, že byly opakovaně, ale ne současně zjišťovány v různých nezávislých experimentech nebo protože představují výsledné hodnoty nezávisle prováděných vyhodnocení, nebo pokud
- b) jedna ze vstupních veličin může být považována za konstantu, nebo pokud
- c) analýza neposkytne informace ukazující přítomnost korelace mezi vstupními veličinami X_i a X_k

V některých případech se lze vyvarovat korelací mezi veličinami vhodným výběrem funkce f modelující postup měření.

Analýza nejistot pro určité měření (někdy nazývaná přehled nejistot měření) musí obsahovat seznam všech zdrojů nejistot spolu s jejich standardními nejistotami měření a způsoby jejich výpočtu nebo odhadu. Pro opakovaná měření musí být zároveň uveden i počet pozorování n . Aby byla zajištěna přehlednost a jasnost údajů, je doporučeno uvádět všechny údaje vztahující se k této analýze v tabulce. Zde je třeba všechny veličiny označovat buď fyzikálním symbolem veličiny X_i nebo krátkým identifikátorem a pro všechny musí být uveden nejméně odhad jejich hodnoty x_i , jemu odpovídající nejistota měření $u(x_i)$, koeficient citlivosti c_i a různě velký příspěvek k nejistotě $u_i(y)$. Pro každou veličinu musí být spolu s její hodnotou uveden v tabulce i rozměr.

3.4 Rozšířená nejistota měření

V rámci EAL (evropské spolupráce pro akreditaci) [2], bylo rozhodnuto, že kalibrační laboratoře akreditované členy EAL musí uvádět rozšířenou nejistotu měření U , stanovenou vynásobením standardní nejistoty $u(y)$ odhadu y koeficientem rozšíření k :

$$U = k \cdot u(y) \quad (3.20)$$

V případech, kdy lze usuzovat na normální (Gaussovo) rozdělení měřené veličiny a kdy standardní nejistota odhadu y je stanovena s dostatečnou spolehlivostí, je třeba použít standardní koeficient rozšíření $k=2$. Takto stanovená rozšířená nejistota odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Tyto podmínky jsou splněny ve většině případů, s kterými se lze setkat při kalibracích.

Předpoklad normálního rozdělení nemůže být v některých případech snadno experimentálně potvrzen. Avšak v případech, kde několik (tj. $N \geq 3$) složek nejistoty odvozených z nezávislých veličin majících rozdělení s běžným průběhem (např. normální nebo rovnoměrné rozdělení) srovnatelná přispívá ke standardní nejistotě odhadu y výstupní veličiny, jsou splněny podmínky Centrální limitní věty, a lze tedy předpokládat, že rozdělení hodnot y je normální.

Spolehlivost standardní nejistoty přiřazené k odhadu hodnoty výstupní veličiny je určena jejími efektivními stupni volnosti. Nicméně, kritérium spolehlivosti je vždy splněno tehdy, když žádný z příspěvků nejistoty, určený dle postupu pro nejistotu typu A, není stanoven z méně než deseti opakovaných pozorování.

Pokud není ani jedna z těchto podmínek splněna (normalita rozdělení či dostatečná spolehlivost), může vést použití standardního koeficientu $k=2$ k rozšířené hodnotě nejistoty odpovídající pravděpodobnosti pokrytí menší než 95%. V těchto případech je pak nutné použít jiné postupy tak, aby bylo zajištěno, že uvedená rozšířená nejistota odpovídá stejné pravděpodobnosti pokrytí jako ve standardním případě. Použití přibližně shodné pravděpodobnosti pokrytí je nezbytné v těch případech, kdy se porovnávají dva výsledky měření stejné veličiny, tj. např. při vyhodnocování mezi-laboratorních porovnání nebo při rozhodování o shodě se zadanou hodnotou.

Dokonce i v případech, kdy je možné předpokládat normální rozdělení, je možné, že stanovení standardní nejistoty odhadu výstupní veličiny není dostatečně spolehlivé. Pokud není možné zvýšit počet opakovaných měření n nebo místo postupu pro stanovení nejistoty typu A, který vede k nízké spolehlivosti standardní nejistoty, použít postup pro stanovení nejistoty typu B, je třeba použít jiný postup.

Ve zbývajících případech, kdy nelze použít předpokladu normálního rozdělení, je nutné stanovit hodnotu koeficientu rozšíření s ohledem na skutečný tvar rozdělení odhadů hodnot výstupní veličiny tak, aby jeho hodnota odpovídala pravděpodobnosti pokrytí asi 95%.

4 Návrh řídicí elektroniky

4.1 Popis návrhu

První podmínkou návrhu přípravku bylo dodržet zavedený koncept, tzn. aby se celé zařízení dalo umístit do typizované krabice, která je využita pro většinu přípravků vyráběných ve společnosti EESA. Průmyslová krabice typu UM 52011 od firmy BOPLA má vnější rozměry $224,2 \times 72,4 \times 198,9$ mm, vnitřní rozměry jsou $195 \times 56 \times 183$ mm. (viz Obrázek 4.1: UM 52011).



Obrázek 4.1: UM 52011

Kompletní elektronika se skládá ze 4 DPS:

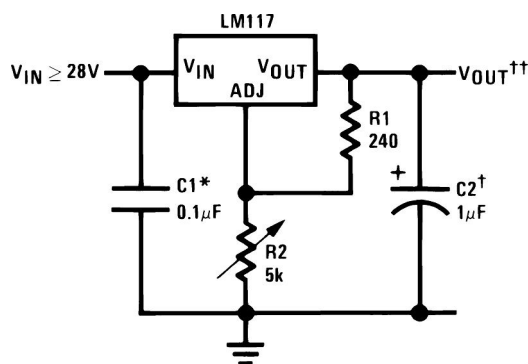
- Deska předního panelu, na které je umístěn konektor pro spojení se základní DPS, display, konektor pro připojení tlačítek a 8 výstupních konektorů. Pojmenována byla **Front Panel** a jeho rozměry jsou 198×64 mm (viz příloha A – Front Panel – schéma a deska plošného spoje).
- Zadní panel obsahuje konektor pro připojení k základní DPS, síťový vypínač, 2 napájecí konektory a dalších 8 výstupních konektorů. **Rear Panel** má rozměry 198×64 mm (viz příloha B – Rear Panel – schéma a deska plošného spoje).
- Nejdůležitějším prvkem Kalinky je deska plošného spoje **Mainboard**, na které se nacházejí hlavní elektronické obvody. Z důvodu montáže desky na dně krabice jsou všechny součástky umístěny na TOP vrstvu. Její rozměry jsou 180×140 mm (viz příloha C – Mainboard – schéma a deska plošného spoje).
- Poslední částí jsou **Output moduly**, které jsou připojeny k Mainboardu pomocí 12 pinových konektorů. Rozměry jsou 54×35 mm (viz Příloha D – Output modul – schéma a deska plošného spoje).

4.2 Napájecí obvod

V důsledku činnosti elektronických obvodů vznikají střídavé rušivé signály. Nejčastěji jsou způsobeny samotnou činností spínaných zdrojů a projevují se zvlněním a šumem stabilizovaného napětí. Tento nežádoucí stav se odstraňuje filtrací napájecího napětí na výstupu ze zdroje, případně další filtrací napětí u jednotlivých integrovaných obvodů. Dále vznikají stejnosměrné rušivé signály, které jsou způsobeny úbytky napájecího napětí na vodičích při velkých proudových odběrech. K odstranění stejnosměrného rušivého signálu se používá galvanicky izolovaný zdroj, čímž se oddělí referenční zem přístroje od napájecí země sítě.

Přípravek je napájen ze síťového adaptéru PWM-01 ELASCO. Na štítku má uvedeny tyto výstupní parametry 12 V / 700 mA. Pro běh Kalinky jsou potřeba dvě různá napětí a to konkrétně 3,3 V a 5 V. Vstupních 12 V je přivedeno přes pojistku do grätzova můstku pro případné usměrnění napájecího napětí, kdy by byl použit jiný napájecí adaptér, a zároveň slouží jako ochrana proti přepólování. Následují tři paralelně zapojené filtrační kondenzátory, které slouží pro blokování napájení, jedná se o elektrolytický kondenzátor o kapacitě 1000 μF a dva SMD 0805 kondenzátory o kapacitě 100 nF. K získání 5 V napájení je použit monolitický třínožičkový stabilizátor 7805, z důvodu případné větší tepelné ztráty je opatřen chladičem.

Pro 3,3 V větev byl zvolen stabilizátor s integrovaným obvodem [12] LM317T v pouzdře TO220. Základní zapojení (viz Obrázek 4.2: Katalogové zapojení LM317) bylo doplněno o dvojici ochranných diod. Pro zvolené výstupní napětí $U_{OUT} = 3,3 V$ platí následující vztah: $R_2 = R_1 \times \left(\frac{U_{OUT}}{1,2} - 1 \right) = 240 \times \left(\frac{3,3}{1,2} - 1 \right) = 420 \Omega$, doporučená hodnota rezistoru $R1$ výrobcem je 240 Ω . Z řady E24 byl vybrán odpor $R_2 = 430 \Omega$



Obrázek 4.2: Katalogové zapojení LM317

K lokálnímu blokování a filtraci napájení slouží kondenzátory, které jsou rovnoměrně rozmístěny na desce plošného spoje. Jsou to elektrolytické tantalové SMD $10\ \mu F$, SMD 0805 o kapacitě $100\ nF$, a elektrolytický $470\ \mu F$. Slouží k redukci impulzních proudů, jež by jinak procházely celou deskou.



Na předním a zadním panelu je umístěno celkem 16 výstupních 4 pinových konektorů MIC-334 typu Male. Byly vybrány z toho důvodu, že budou neustálou manipulací namáhány, a proto musejí být dostatečně odolné.

Spínací tranzistory je v případě potřeby možné napájet přes vestavěné rezistory $1,8\text{ k}\Omega$ z vnitřního zdroje $+5V_{ext} - EGND$ sepnutím propojek X1 až X8. Vnitřní zdroj je vytvořen pomocí DC/DC převodníku CHM0505 od firmy Hypel. Napětí zdroje $+5V_{ext} - EGND$ je galvanicky odděleno od napájecí části Kalinky a je společné pro čtveřici simulátorů průtoku (viz příloha D – Obr. D.1: Schéma výstupního modulu).

- 35 -

Mikroprocesor

K řízené simulaci průtokoměrů a komunikaci s prostředím byl použit mikroprocesor řady 8051 od firmy Silicon Laboratories C8051F020 [9].

4.3.1 Vlastnosti

Velmi rychlé jádro 8051

- Architektura Pipe-line – až 70% instrukcí je vykonáno v jednom nebo dvou strojových cyklech
- Výpočetní výkon až 25 MIPS při 25 MHz
- 22 zdrojů přerušení

Paměť

- 4352 B vnitřní datové RAM (256 + 4k)
- 64 KB FLASH
- Rozhraní pro vnější 64kB datovou paměť s přenosovou rychlostí až 5 MB/s

Digitální periferie

- 64 I/O portů
- Hardware SMBus™ (I2C™ Compatible), SPI™, 2 plně duplexní UART sériové porty
- 16-bitové programovatelné čítací/časovací pole s 5 jednotkami pro zachycení/porovnání
- 5×16bitový čítač/časovač
- Vyhrazený Watch-Dog Timer, Bi-directional Reset

Zdroj hodin

- Vnitřní programovatelný oscilátor 2 až 16 MHz s tolerancí $\pm 2\%$ a podporou UART
- Vnější oscilátor: Krystal, RC, C, nebo hodiny
- Násobič pro dosažení interní frekvence až 50 MHz
- Možnost přepínat hodinové zdroje za provozu

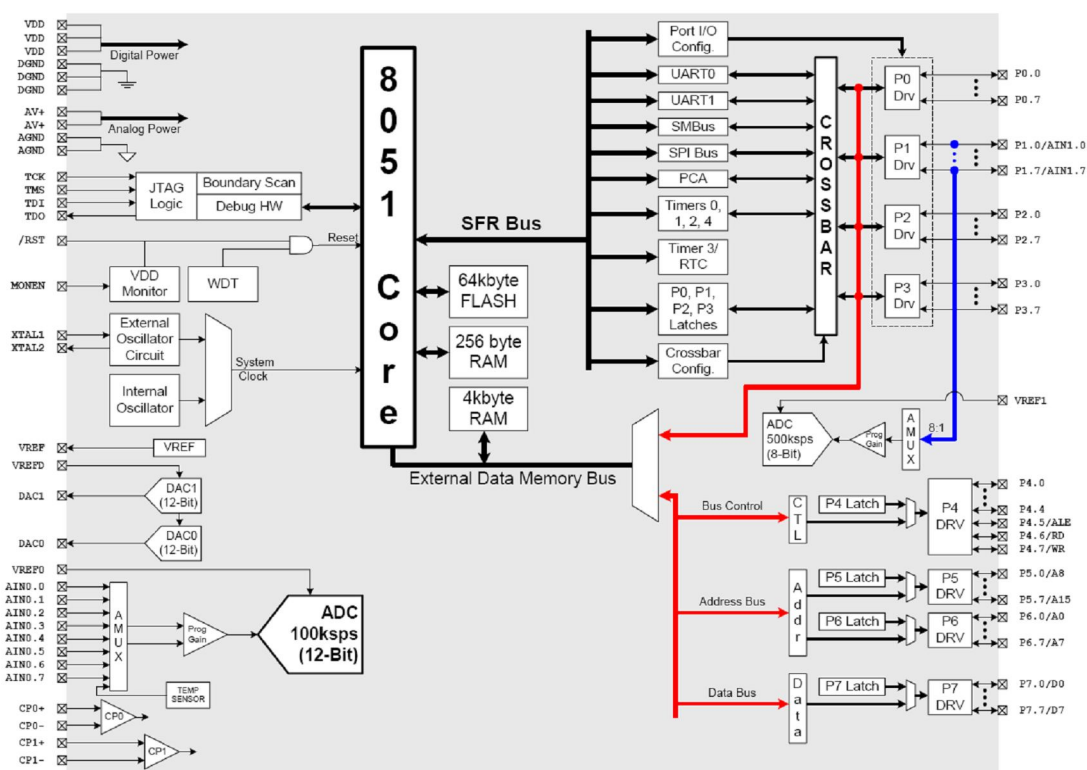
AD/DA převodníky

- 12-bit AD, programovatelná rychlost převodu až 100 ksp/s;
- 8-bit AD, programovatelná rychlost převodu až 500 ksp/s;
- 2×12-bit DA

2 analogové komparátory

On-chip Debug

- Ladicí rozhraní JTAG přímo součástí mikroprocesoru
- Ladicí obvod na čipu umožňuje nejvyšší rychlost a možnost ladění v aplikaci (nevyžaduje emulátor)
- poskytuje body přerušení jednotlivým krokům a kontrolu a úpravu paměti a registrů
- nízké náklady, kompletní vývojové prostředí



Obrázek 4.4: C8051F020 – Blokový diagram

Mikroprocesor C8051F020 se vyrábí ve 100 vývodovém TQFP pouzdru a obsahuje obvod pro sledování napájecího napětí (VDD monitor), watchdog a hodinový oscilátor. Mikroprocesor C8051F020 patří mezi zcela nezávislé systémy. Všechny analogové a digitální periferní obvody lze z úsporných důvodů vypnout buď jednotlivě nebo hromadně.

Mikroprocesor má předepsané napájecí napětí v rozsahu 2,7 V až 3,6 V a je určený pro průmyslovou činnost v rozsahu teplot od -45°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Porty I/O, /RST, a piny JTAG snesou vstupní signály až 5 V.

Mikroprocesory C8051F020 používá vlastní jádro CIP-51 od Silicon Labs, které je kompatibilní s instrukčním souborem MCS-51. Pro vývoj software tak mohou být použity standardní kompilátory assembleru určené pro rodiny 803x/805x.



Obrázek 4.5: Vývojové prostředí

4.3.2 Architektura

Jádro CIP51 používá pipe-line architekturu, která výrazně zvyšuje jeho instrukční výkon oproti standardní architektuře 8051. V rodině 8051 všechny instrukce s výjimkou MUL a DIV vyžadují pro své provedení 12 nebo 24 hodinových taktů, a maximální kmitočet oscilátoru je obvykle v rozmezí 12 až 24 MHz, zatímco jádro CIP-51 vykoná až 70% instrukcí v jednom nebo dvou hodinových cyklech a pouze 4 instrukce vyžadují více jak 4 hodinové cykly.

V implementacích 8051 je rozdíl mezi strojovými cykly a hodinovými cykly, jeden strojový cyklus mívá délku až 12 hodinových cyklů. Mikroprocesor CIP- 51 je založen výhradně na jednotaktovém hodinovém cyklu. Všechny potřebné časy instrukcí jsou specifikovány v rámci hodinových cyklů. Klasická 8051 vykoná v jednom strojovém cyklu například při jednobajtové jednocyklové instrukci čtení operačního znaku v prvním hodinovém cyklu a poté 11 hodinových cyklů čeká, až nastane další strojový cyklus a tedy čtení operačního znaku další instrukce. CIP-51 oproti tomu vykoná v jednom hodinovém cyklu čtení operačního znaku instrukce a hned v dalším hodinovém cyklu může pokračovat ve vykonávání instrukce.

Díky tomu pipe-line architektura CIP-51 provede většinu instrukcí v tolika hodinových cyklech jako kolika-bajtová je instrukce. Podmínkou větvení instrukcí je jeden druhotný hodinový cyklus k dokončení.

Při interním hodinovém kmitočtu jádra CIP-51 25 MHz to představuje výkon až 25 MIPS. CIP-51 má celkem 109 instrukcí.

4.3.3 Ošetření vstupů

Mikroprocesor má 3 možné způsoby zapojení I/O portů:

- 1) vnitřní pull-up rezistory,
- 2) pevné výstupy log. „0“ nebo log. „1“, kdy úroveň je přepínána pomocí MOSFET tranzistorů,
- 3) stav vysoké impedance.

Pro zvýšení odolnosti proti zarušení užitečného signálu bylo zapojení s vnitřními pull-up rezistory doplněno o vnější paralelně připojené rezistory.

4.3.4 Časování a reset mikroprocesoru

Mikroprocesor ke své činnosti a správné funkci potřebuje nějaký zdroj hodinových impulzů o určité frekvenci (f_{osc}), které využívají vnitřní obvody mikroprocesoru a od kterého je pak odvozena doba vykonávaných instrukcí.

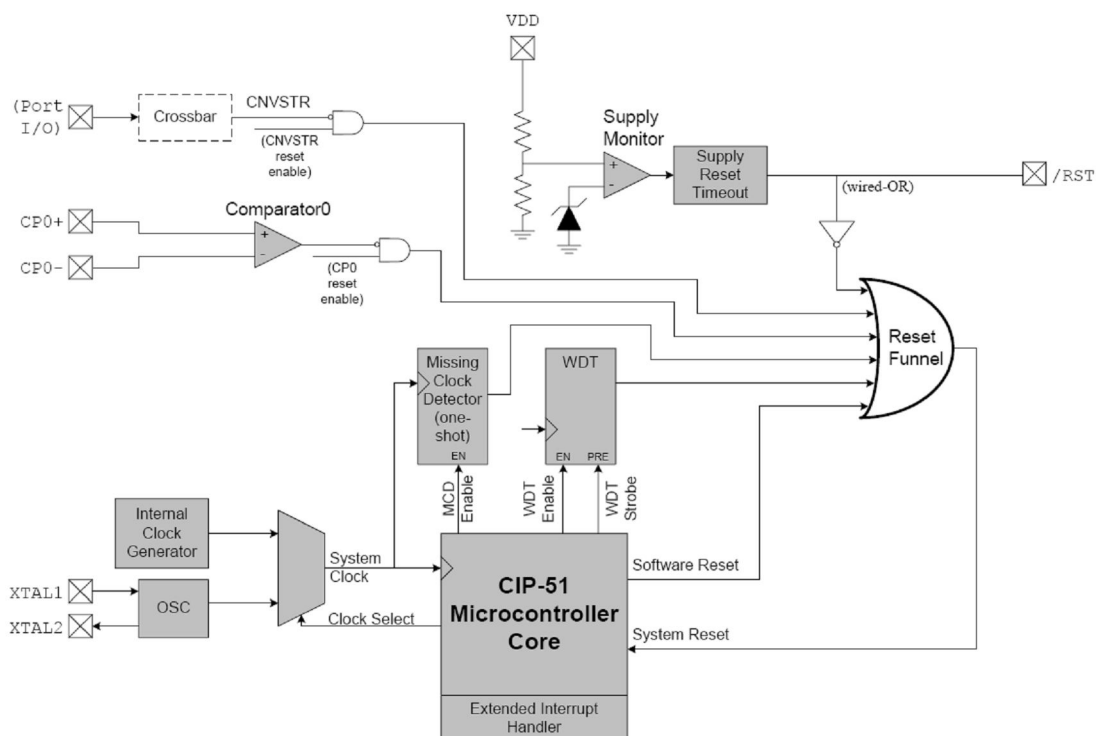
Mikroprocesor má vnitřní hodinový generátor, který se implicitně používá po každém resetu. Můžeme použít i externí oscilátor, kterým může být krystal, keramický kondenzátor či RC oscilátor. Toto je velmi žádané v nízko výkonových aplikacích, dovolujících mikroprocesoru, aby běžel na nízkém taktu (energetická úspora) a pokud je potřeba, tak aby se přepnul na rychlejší (až 16 Mhz) vnitřní oscilátor.

Jako zdroj hodinového kmitočtu byl použit externí krystal GEYER o frekvenci 22,1184 Mhz, který je připojen mezi vývody XTAL1 a XTAL2 spolu s dvojicí SMD kondenzátorů o kapacitě 27 pF, které jsou připojeny na GND.

Mikroprocesor obsahuje 7 resetovacích zdrojů umístěných na čipu: obvod sledování napájecího napětí (VDD monitor), Watchdog, detektor hodinových cyklů, detekce úrovně napětí komparátoru, nucený software reset, vstup CNVSTR a \overline{RST} pin. \overline{RST} pin je obousměrný, připravený na vnější reset. Každý resetovací zdroj s výjimkou VDD monitoru a \overline{RST} může být zakázán uživatelem v programu. VDD monitor se povoluje/zakazuje přes pin MONEN. Watchdog může být permanentně povolený v programu po resetu během inicializace mikroprocesoru.

Po připojení napětí se drží mikroprocesor ve stavu reset dokud napájecí napětí nedosáhne hranice U_{RST} . Pin \overline{RST} je poté ještě v log. „0“ po dobu 100 ms, což poskytuje časový interval za účelem ustálení napájecího napětí. Při snížení napětí pod U_{RST} zajistí VDD monitor, že \overline{RST} se nastaví opět do log. „0“ a mikroprocesor se

resetuje a proces se znovu opakuje. Další možností je vnější reset. Přivedením log. „0“ na pin \overline{RST} uvedeme mikroprocesor do resetu. Je vhodné vstup ošetřit vnějším pull-up rezistorem, abychom se vyhnuli indukovaní chybného šumu. Mikroprocesor zůstává v reset stavu po dobu 12 hodinových cyklů po aktivaci \overline{RST} .



Obrázek 4.6: Hodiny a reset

4.3.5 JTAG

Mikroprocesor je vybaven ladicím JTAG rozhraním [16]. Tato testovací architektura byla vyvinuta Joint Test Action Group a později byla převzata organizací IEEE jako IEEE Standard Test Access Port and Boundary Scan a označena jako IEEE 1149.1 Tento standard představuje efektivní metodu testování užívající metody skenování rozhraní - boundary - scan technique.

JTAG rozhraní je nezávislé na zdrojích mikroprocesoru a umožňuje úplnou kontrolu činnosti procesoru i při jeho plné rychlosti. Tato ladicí logika podporuje kontrolu a modifikaci paměti a registrů, souboru bodů přerušení, ladění po jednotlivých krocích a umožňuje využít příkazy pro běh a zastavení aplikace. Všechny analogové a binární periférie jsou při použití ladění přes JTAG plně funkční. Nejsou potřeba žádné další obvody jako RAM, programová paměť, časovače nebo komunikační kanály. Všechny periférie (s výjimkou ADC a SMBus) se zastaví, když

se zastaví mikroprocesor během krokování, nebo při přerušení za účelem synchronizace.

Pro přístup k testovacím funkcím vestavěným do obvodu slouží Test Access Port, skládá se minimálně ze tří vstupních a jednoho výstupního signálu:

- TDI: (Test Data In) – sériový vstup pro přenos dat a instrukcí.
- TDO: (Test Data Out) – sériový výstup pro přenos dat a instrukcí.
- TMS: (Test Mode Select) – sériový vstup pro řídicí bity testovací logiky.
- TCK: (Test Clock) – hodiny pro testovací logiku, pomocí nichž se posouvají data a instrukce. Maximální frekvence je 20 MHz. Vstupní data se načítají náběžnou hranou a výstupní data se vysouvají sestupnou hranou.

Veškeré řízení a zpracování celé komunikace probíhá prostřednictvím sériového načítání instrukce vstupem TDI do instrukčního registru IR nebo dat do Data registru DR. DR registr skenuje v Boundary-Scanu 134 bitový posuvný registr, to umožňuje kontrolu všech pinů i SFR registrů pomocí instrukcí EXTEST a SAMPLE.

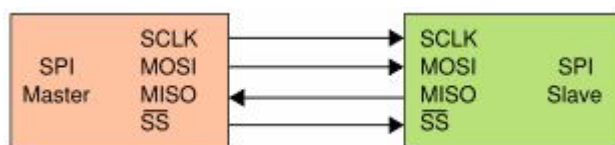
Piny TMS, TCK, TDI, TDO spolu s +3 V a GND jsou vyvedeny do konektoru J5-2, který se připojuje přes JTAG-RS232 adaptér do PC.

4.4 Paměť EEPROM

Paměť typu EEPROM lze opakovatelně přepisovat. Paměťová informace se uchovává v podobě elektrického náboje. Smazání se provádí pomocí elektrických impulzů, doba mazání se pohybuje řádově v jednotkách milisekund. Paměť je možno vymazat celou naráz nebo po jednotlivých bytech.

Pro náš účel byla vybrána paměť AT25040 se sériovou SPI sběrnici. Piny paměti SI, SO, SCK, \overline{CS} jsou připojeny do mikroprocesoru na piny P0.2 až P0.5 a úroveň signálu je podpořena pull-up rezistory. Tato paměť je optimalizovaná pro použití v průmyslových a komerčních aplikacích, vyznačuje se nízkou spotřebou a vysokým teplotním rozsahem od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ v pracovním režimu.

Účelem požití paměti EEPROM v této aplikaci je uložení konfigurace celé řídicí jednotky v případě výpadku napájení.



Obrázek 4.7: SPI rozhraní

4.5 Popis ovládacích prvků

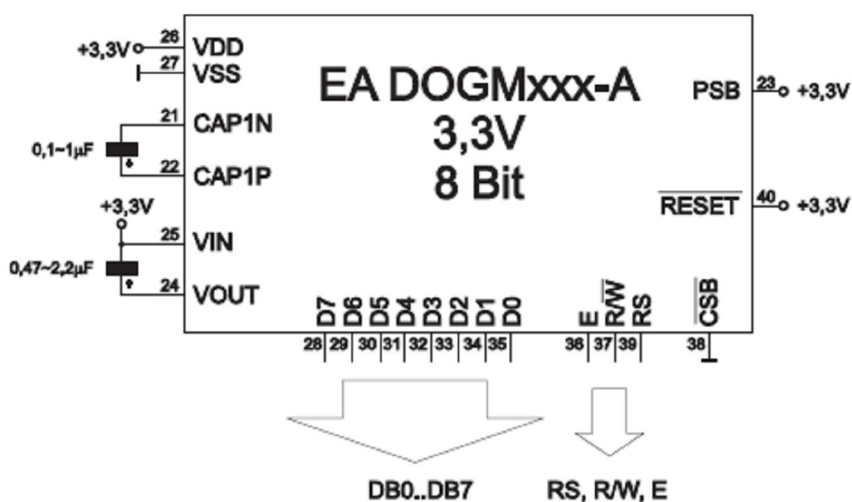
Kvůli pohodlnějšímu ovládání Kalinky obsluhou kalibrační linky byl přípravek doplněn o informační display, na kterém se dají pomocí klávesnice nastavovat jednotlivé výstupy.

4.5.1 LCD

Jako zobrazovací jednotka byl vybrán dvouřádkový alfanumerický display EA DOG M162B-A. Jde o display s bílými znaky a s modrým podsvícením (viz Obrázek 4.8: Barevné provedení LCD), který funguje jak s 3,3 V, tak i s 5 V napájením. Nespornými výhodami tohoto displeje je možnost komunikace po 8bitové, 4bitové a dokonce i sériové SPI sběrnici a dále pak řízení kontrastu displeje digitálně. Pro rychlou komunikaci byl zvolen 8bitový režim, napájení 3,3 V. Více o displeji na [13]. Zapojení (viz Obrázek 4.9: Popis zapojení LCD)



Obrázek 4.8: Barevné provedení LCD



Obrázek 4.9: Popis zapojení LCD

Datová sběrnice D0 až D7 je ovládána řídicími vstupy EN (chip select), RS (instrukce/data) a \overline{RW} (čtení nebo zápis). Zatímco datová sběrnice i vstupy RS

a $R\overline{W}$ jsou odděleny od procesoru bufferem 74HC245, signál EN je invertován pomocí FET tranzistoru BS138, a to z důvodu zabránění aktivace displeje během doby resetu mikroprocesoru.

4.5.2 Budič sběrnice 74HC245

Z důvodu větší vzdálenosti mezi mikroprocesorem a displejem byl do obvodu přidán budič sběrnice s IO 74HC245, který zároveň slouží k oddělení komunikačních signálů.

Tento obvod obsahuje 8 třístavových budičů sběrnice (přijímačů / vysílačů) pro obousměrnou komunikaci mezi vedeními datové sběrnice. Obvod pracuje jako obousměrný neinvertující zesilovač. Směr přenosu je řízen podle *tabulky 4.1* z [10].

Tabulka 4.1: Směr řízení přenosu

Vstupy		Vstupy/výstupy	
\overline{G}	DIR	An	Bn
L	L	A=B	vstup
L	H	vstup	B=A
H	X	Z	Z

Vstup \overline{G} je povolovací, pokud je vstup \overline{G} v log. „1“, pak je obvod ve stavu vysoké impedance. Přivedením log. „0“ na \overline{G} se povolí přenos. O tom jaký bude směr přenosu rozhoduje vstup DIR. Pokud je DIR v log. „0“ pak je směr přenosu z B do A, při log. „1“ je směr opačný, tedy z A do B.

V našem případě je potřeba, aby směr přenosu byl z mikroprocesoru do displeje. Tedy podle schématu z A do B. Proto jsme nastavili povolovací vstup \overline{G} do log. „0“ a na výběrový vstup DIR přivedli log. „1“.

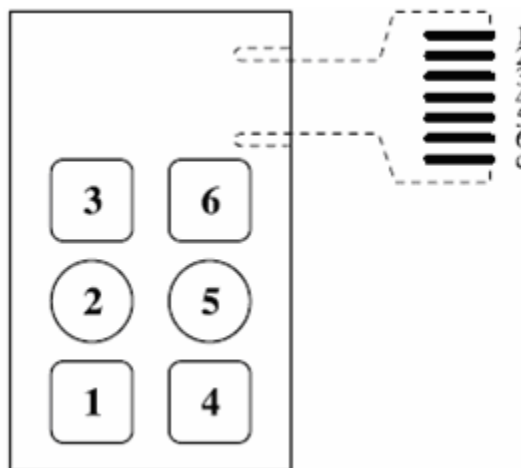
4.5.3 Klávesnice

Pro snazší obsluhu bylo potřeba Kalinku vybavit klávesnicí. Podle zadavatele měla obsahovat 5 tlačítek. Šipku doleva, doprava, start, stop a nulování. Zvolena byla membránová fóliová klávesnice. Z důvodu, že se jedná o levný, kvalitní a přizpůsobitelný elektromechanický spínací prvek, který se vyznačuje jednoduchou montáží (princip samolepky). Použita byla 6 tlačítková klávesnice [14] společnosti Tesla Jihlava a.s., kterou nabízejí ve svém standardním výrobním programu.

Klávesnice je zakončena krimpovanými kolíky s roztečí 2,54 mm. Kód spínání je proti jednomu společnému kontaktu (viz *Obrázek 4.11: Kód spínání*).



Obrázek 4.10: Nákres klávesnice



Obrázek 4.11: Kód spínání

Kontakty 1 až 6 jsou pull-upovány rezistory o hodnotě 10 k Ω . Aby mikroprocesor nemusel tlačítka skenovat průběžně, je testování tlačítek řešeno pomocí přerušení. Zpracování signálů pod přerušením je velmi užitečné při nutnosti obsloužit úlohu v reálném čase.

Za tímto účelem bylo využito jednoho ze tří 3 vstupového hradla AND, které je integrováno v obvodu 74HC11. Na vstupy druhého hradla, jsou přivedeny póly z tlačítek 3, 4 a 6. Pokud jsou tlačítka nestisknutá (všechny mají stav log. „1“), tak i výstup hradla (pin č. 6) je v log. „1“. Ve chvíli, kdy se stiskne nějaké z uvedených tlačítek, tak se na vstupu hradla objeví log. „0“. To má za následek nulovou úroveň signálu na výstupu z hradla. Signál je pak veden přímo do mikroprocesoru na pin přerušení INT0, kde se vzniklé přerušení z klávesnice obslouží.

4.6 Komunikační modul RS232

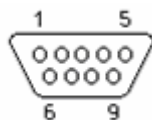
Pro řízení mikroprocesoru, byla kvůli jednoduchosti zvolena sériová sběrnice RS232. Rozhraní RS232 se používá pro spojení dvou zařízení mezi sebou a to jen do vzdálenosti 15 m při přenosové rychlosti 20 kb/s. RS232 používá dvě logické úrovně, log „1“ a log „0“. Povolené napěťové úrovně pro logickou „1“ jsou od -5 V do -15 V pro vysílač resp. od -3 V do -25 V pro přijímač a pro logickou „0“ od $+5\text{ V}$ do $+15\text{ V}$ pro vysílač resp. od $+3\text{ V}$ do $+25\text{ V}$ pro přijímač. V minimální konfiguraci lze pro spojení použít pouze tři vodiče. RxD pro příjem informace, TxD pro vysílání informace a GND jako signálovou zem. Více na [7].

Pro převod napěťových úrovní byl vybrán integrovaný obvod MAX232. Tento obvod je napájen $+5\text{ V}$, vyšší napětí pro RS232 se získává pomocí nábojové pumpy.

Jelikož firma EESA používá ve svých měřicích vlastní 20 pinový modul RS232, který obsahuje IO ADM232, rozhodl jsem se tento modul využít. DC/DC převodník CHM0505 zajišťuje galvanické oddělení modul od ostatní elektroniky přístroje. Nespornou výhodou takového řešení v případě poruchy je snadná výměna modulu, čímž se zkrátí doba, po kterou bude přípravek vyřazen z funkčnosti.

Tabulka 4.2: Popis zapojení konektoru Canon 9

Vývod	Název	Popis
2	TxD	Vysílač
3	RxD	Přijímač
5	GND	Zemnění



Obrázek 4.12: 9 vývodový konektor D-SUB Male

4.7 Ostatní obvody

V této kapitole popíši obvody, které sice nejsou z hlediska použitelnosti přístroje nutné, ale zcela jistě konstrukci zpřehlední.

4.7.1 LED diody

3,3V napájení procesoru je indikováno svítivou červenou LED diodou. Zařízení obsahuje ještě další 2 zelené LED diody, které jsou na portech P4.0 a P4.1. Jsou zapojeny s předřadnými $1\text{ k}\Omega$ rezistory a aktivují se log. „0“. Jejich použití se prokáže například při ladění programu nebo pro indikaci uživatelského modu.

4.7.2 Přepínač DIP4

Tímto přepínačem je možno přípravek Kalinka nastavit do 4 různých pracovních režimů. Přepínač je zapojen na piny mikroprocesoru P6.0 až P6.3.

4.7.3 Měřicí body

Na pinech mikroprocesoru P3.3, P6.4 a P6.5 se nacházejí měřicí body. Jde o prokovené otvory, které je možno využít při ladění programu.

4.7.4 Propojovací konektory

Na Front Panel je vyvedeno celkem 16 vodičů z Output modulů, 14 vodičů je potřeba pro display a dalších 10 vodičů je nutných pro signály z klávesnice a napájení. Letovat takové množství napevno propojovacími vodiči by bylo velmi pracné a navíc v případě poruchy by nebylo možné jednoduše oddělit hlavní desku od předního panelu. Obdobný problém nastal i Rear Panelu.

Proto byla zvolena možnost, že se tyto vodiče pro oba panely povedou přes spojovací konektory pomocí sběrnice. Vybrán byl dvouřadý 40 pinový konektor. V případě poruchy se pak přední i zadní panel nechá od hlavní desky jednoduše odpojit vysunutím sběrnice.

5 Konstrukce hardwaru

V předchozí kapitole jsme řešili návrh řídicí elektroniky. V této části popisujeme praktickou realizaci návrhu. Desky plošných spojů byly navrženy pomocí návrhového systému OrCAD 10.3 firmy Cadence. Data byla zpracována a desky vyrobeny laboratoří PCBlab, která funguje pod Ústavem informačních technologií a elektroniky. Potřebné součástky byly dodány od zadavatele firmy EESA a napájeny na desky plošných spojů. Mnou vyrobený čelní a zadní krycí panel spolu s DPS byly usazeny do průmyslové krabice.

5.1 Tvorba schématu v programu OrCAD Capture CIS

Program OrCAD Capture CIS 10.3 je určen pro návrh elektrického schématu. Schéma je potom podkladem pro tvorbu desky plošného spoje. Přestože základní knihovny návrhového systému obsahují více než 44 000 součástek, nebyly některé součástky a jejich „footprinty“ (přiřazené pouzdro pro danou součástku) v databázi. V důsledku čehož byla použita knihovna Ptak, kterou vytvořil vedoucí mé práce.

Schéma hlavní desky bylo kvůli přehlednosti rozděleno na několik částí: CORE, EEPROM, RS232, DISPLAY, POWER a CONNECTOR. Jednou z výhod tohoto návrhového systému je možnost propojování přes jména uzlů tzv. „Net Alias“, aniž by bylo nutné tyto vodiče vést mezi příslušnými piny, což výrazně zpřehlední schéma a usnadní práci.

V průběhu editace schématu program umožňuje automatickou anotaci (očíslování komponent), kontrolu návrhových a elektrických pravidel DRC (upozorňuje na možné problémy s propojením při přidávání uzlů spojů – např. na spojení dvou výstupních bran), dále se nechají vytvořit materiálové rozpisky (Bill of Material) na základě informací obsažených v matici schématu. Po konečné kontrole návrhových pravidel byl vygenerován soubor netlist, který je základním spojovacím článkem pro návrh plošného spoje. Více viz [17].

5.2 Tvorba desky plošného spoje v programu OrCAD Layout Plus

S pomocí tohoto programu byla vytvořena konkrétní podoba desky plošného spoje. Systém dokáže vytvářet až 16vrstvé desky. Vzhledem k ekonomickému hledisku byla zvolena oboustranná deska se snahou o co nejmenší počet prokůvů (vodivých spojení mezi vrstvami).

Načtením netlistu v tomto programu, při splnění podmínky, že ve schématu jsou ke každé součástce přiřazené „footprinty“, dojde k zobrazení pouzder všech součástek a vodivých čar mezi jednotlivými vývody součástek tak, jak jsme je vytvořili ve schématu. Obrys desky byl nakreslen podle daných rozměrů ve vrstvě Global layer a do tohoto obrysu umístěny konstrukční díry pro uchycení k průmyslové krabici.

OrCAD Layout Plus má zabudovanou funkci automatického rozmístění součástek na plochu desky tzv. „autoplacing“. Rozmístění součástek bylo přesto uděláno ručně, protože tento systém nerespektuje určitá pravidla:

- výkonové součástky umístit tak, aby veškeré cesty, kterými protéká větší proud byly co nejkratší,
- umístit nízkovýkonové a citlivé součástky co nejdále od součástek výkonových,
- integrované obvody a ostatní součástky umísťovat jedním směrem a zvažovat estetická kritéria,
- zvažovat vnější vztahy při umísťování vývodů, ovládacích prvků a konektorů z desky.

Po rozmístění součástek byly nataženy vodivé spoje mezi jednotlivými součástkami. Tuto operaci lze také provádět automaticky pomocí funkce „autorouting“, která v dané zakoupené verzi systému OrCAD není dostatečně použitelná.

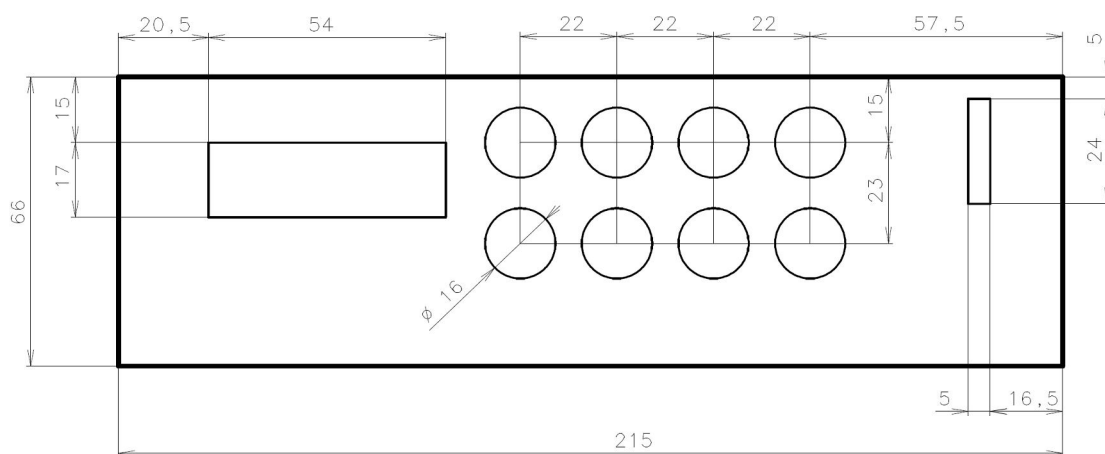
Ačkoli byl návrh pracný a časově náročný byly taženy všechny spoje ručně. Kvůli snížení charakteristické impedance mezi spoji byla po celé ploše rozlita měď s potenciálem GND.

Velmi důležitým parametrem při návrhu DPS je volba konstrukční třídy, která určuje pravidla návrhu (šířku spojů, vzdálenost mezi sousedními pady) plošného spoje. K našemu účelu stačila 4. třída. Pro nevýkonové signály je šířka spoje 12 mils (0,3 mm), pro napájecí a výkonové spoje byla zvolena šířka 40 mils (1 mm).

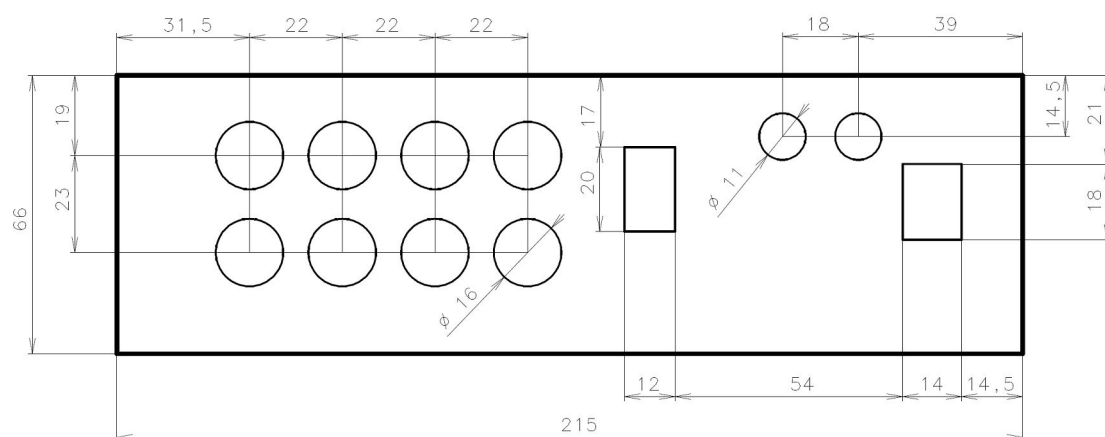
5.3 Konstrukce čelního a zadního krycího panelu

K výrobě čelního a zadního krycího panelu byla použita deska z hliníkového materiálu. Rozměry udala velikost průmyslové krabice. Deska předního a zadního plošného spoje byla uchycena v postranních drážkách krabice, čímž vznikl prostor pro umístění displeje a konektorů.

Dále bylo vyvrtáno 16 otvorů o průměru 16 mm pro výstupní konektory. Poslední otvor na předním panelu je pro sběrnici klávesnice. Zadní panel obsahuje hlavní vypínač, 2 konektory pro napájení, konektor sériové komunikace RS232 a 8 dalších výstupních konektorů.



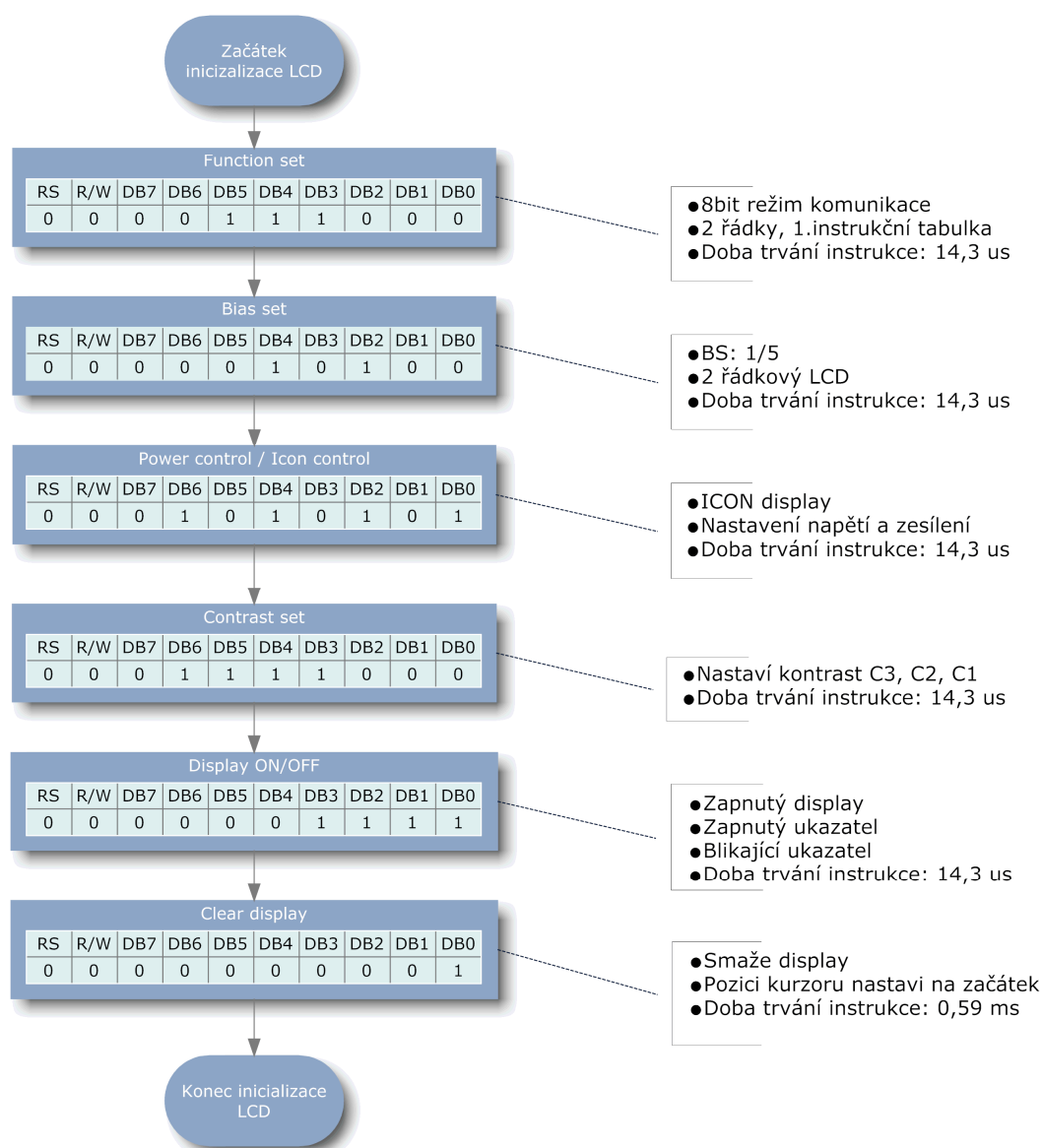
Obrázek 5.1: Čelní krycí panel

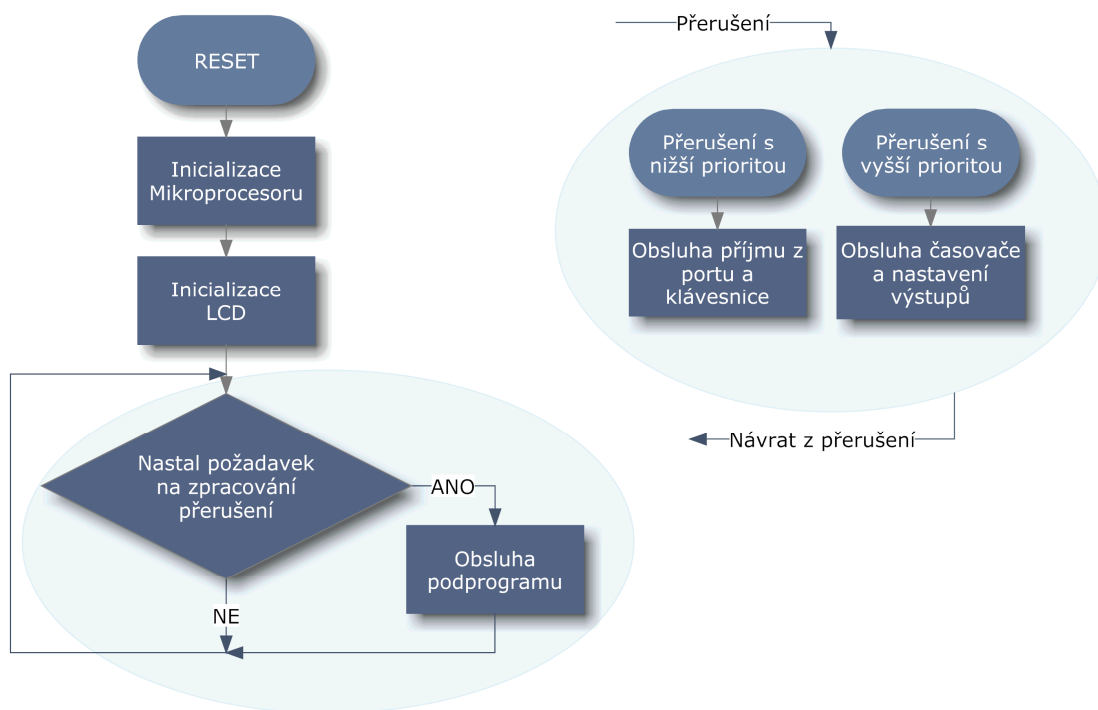


Obrázek 5.2: Zadní krycí panel

5.4 Základní software

Program je psaný v jazyku symbolických adres (JSA) a přes rozhraní JTAG nahrán do mikroprocesoru. Uvádím příklad inicializace displeje pomocí vývojového diagramu (více nalezneme na [13] a [9]) :





Závěr

Po nastudování teorie měření tepla, průtoku a principu kalibrace měřičů tepla jsem navrhl jednotlivé funkční bloky zařízení. Hlavním prvkem obvodu se stal mikroprocesor firmy Silabs Laboratories, který zajišťuje simulaci 16 měřičů průtoku.

K přednostem Kalinky patří jednoduché ovládání, možnost měnit nastavení výstupních parametrů jak z klávesnice, tak po sběrnici RS232 pro každou čtveřici simulátorů průtoku zvlášť. Kalibrační data a některá nastavení se pro případ výpadku elektrické energie zálohují do paměti typu EEPROM. Jelikož je Kalinka určena do průmyslové oblasti tak nespornou výhodou je modulové provedení komunikačního rozhraní a výstupních modulů, které jsou nejvíce náchylné k poruše. V případě poškození výstupního modulu se po dobu opravy jednoduše vymění za jiný, což výrazně zkrátí čas, po který bude kalibrační linka vyřazena z provozu a sníží se tím případné ekonomické ztráty.

V požadavcích zadavatele firmy EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou bylo 8 simulátorů průtoku. Pro případ expanze firmy a následné rozšíření kalibračních linek jsem se po dohodě se zadavatelem rozhodl zvýšit tento stav na 16 simulátorů, čímž jsem zároveň plně využil možnosti použitého procesoru.

Díky této práci jsem si rozšířil a upevnil znalosti v oblasti měření. Vyzkoušel jsem si návrh oboustranného prokoveného plošného spoje s nepájivou maskou v návrhovém prostředí OrCAD, následné osazení a práci se součástkami SMD pro povrchovou montáž. Návrh a konkrétní realizaci řídicí elektroniky pro kalibrační teploměrnou linku se mi podařilo úspěšně splnit.

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Maximální délky přívodů pro snímače teploty Pt 100	- 14 -
Tabulka 2.1: Vstupní a výstupní signály pro zkoušené zařízení	- 21 -
Tabulka 2.2: Elektrické a mechanické specifikace pro normalizované zkušební zařízení	- 21 -
Tabulka 4.1: Směr řízení přenosu	- 43 -
Tabulka 4.2: Popis zapojení konektoru Canon 9	- 45 -

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: MT500 – Oddělené provedení	- 11 -
Obrázek 1.2: Snímač teploty – typ DS	- 14 -
Obrázek 1.3: Snímač teploty s kabelovým přívodem	- 15 -
Obrázek 2.1: Komunikační propojení měřiče tepla	- 22 -
Obrázek 4.1: UM 52011	- 33 -
Obrázek 4.2: Katalogové zapojení LM317	- 34 -
Obrázek 4.3: Schéma napájecího obvodu	- 35 -
Obrázek 4.5: C8051F020 – Blokovaný diagram	- 37 -
Obrázek 4.6: Vývojové prostředí	- 38 -
Obrázek 4.7: Hodiny a reset	- 40 -
Obrázek 4.8: SPI rozhraní	- 41 -
Obrázek 4.9: Barevné provedení LCD	- 42 -
Obrázek 4.10: Popis zapojení LCD	- 42 -
Obrázek 4.11: Náčrt klávesnice	- 44 -
Obrázek 4.12: Kód spínání	- 44 -
Obrázek 4.13: 9 vývodový konektor D-SUB Male	- 45 -
Obrázek 5.1: Čelní krycí panel	- 49 -
Obrázek 5.2: Zadní krycí panel	- 49 -
Obr. A.1: Schéma předního panelu	- 58 -
Obr. A.2: Vrchní strana DPS předního panelu	- 58 -
Obr. A.3: Spodní strana DPS předního panelu	- 58 -
Obr. B.1: Schéma zadního panelu	- 59 -
Obr. B.2: Vrchní strana DPS zadního panelu	- 59 -
Obr. B.3: Spodní strana DPS zadního panelu	- 59 -

Obr. C.1: Schéma mainbordu	- 60 -
Obr. C.2: Vrchní strana DPS mainbordu	- 61 -
Obr. C.3: Spodní strana DPS mainbordu	- 61 -
Obr. C.4: Osazovací schéma mainbordu	- 62 -
Obr. D.1: Schéma výstupního modulu	- 63 -
Obr. D.2: Vrchní strana DPS výstupního modulu	- 63 -
Obr. D.3: Spodní strana DPS výstupního modulu	- 63 -
Obr. D.4: Osazovací schéma výstupního modulu	- 63 -

Seznam odborné literatury

- [1] Adunka, Dr. F.: *Handbuch der Wärmeverbrauchsmessung*. Essen: Vulkan-Verl., 1991. ISBN 3-8027-2364-3.
- [2] Český institut pro akreditaci. [online], [cit. 6. 1. 2008]. <www.cia.cz>
- [3] Český Metrologický institut. [online], [cit. 6. 1. 2008]. <www.cmi.cz>
- [4] ČSN EN 1434-1. *Měřiče tepla – Část 1: Všeobecné požadavky*. Český normalizační institut Praha, 2007. 24 stran.
- [5] ČSN EN 1434-2. *Měřiče tepla – Část 2: Požadavky na konstrukci*. Český normalizační institut Praha, 2007. 30 stran.
- [6] Hrbáček, J.: *Komunikace mikrokontroléru s okolím*. Praha 1999: BEN. 159 s. ISBN 80-86056-42-2.
- [7] HW server. *HW server představuje – RS232* [online] 2003, [cit. 21. 4. 2008]. URL: <<http://rs232.hw.cz/>>
- [8] Katalogový list firmy EESA – měřič tepla [online], [cit. 18. 2. 2008]. URL: <www.eesa.cz/index.php?lng=cz&pg=pro3>
- [9] Katalogový list firmy Silicon Laboratories. *C8051F020/1/2/3-DS14* [online]. Verze 1.4 © 2003, poslední aktualizace 12.2003, [cit. 10. 3. 2008]. URL: <www.silabs.com/public/documents/tpub_doc/dsheet/Microcontrollers/Precision_Mixed-Signal/en/C8051F02x.pdf>
- [10] Katalogový list firmy Philips Semiconductors. *74HC/HCT245 Octal bus transceiver; 3-state* [online] 9.1993, [cit. 15. 3. 2008]. URL: <www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/74HCHCT245CNV_2.pdf>
- [11] Katalogový list firmy Philips Semiconductors. *74HC/HCT11 Triple 3-input AND gate* [online] 9.1993, [cit. 15. 3. 2008]. URL: <www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/74HCHCT11CNV_2.pdf>
- [12] Katalogový list firmy ST Microelectronics. *LM117/217/317 Voltage Regulator* [online] 2. 2003, [cit. 16. 3. 2008] URL: <www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2154.pdf>
- [13] Katalogový list firmy Electronic Assembly. *EA DOG-M Series 3.3V* [online] 6.2007, [cit. 15. 3. 2008] URL: <www.lcd-module.de/eng/pdf/doma/dog-me.pdf>
- [14] Katalogový list firmy Tesla Jihlava, a.s. *Fóliové klávesnice* [online] [cit. 26. 3. 2008] URL: <www.ttklavesnice.cz/cs/soubory/klavesnice_cz.pdf>

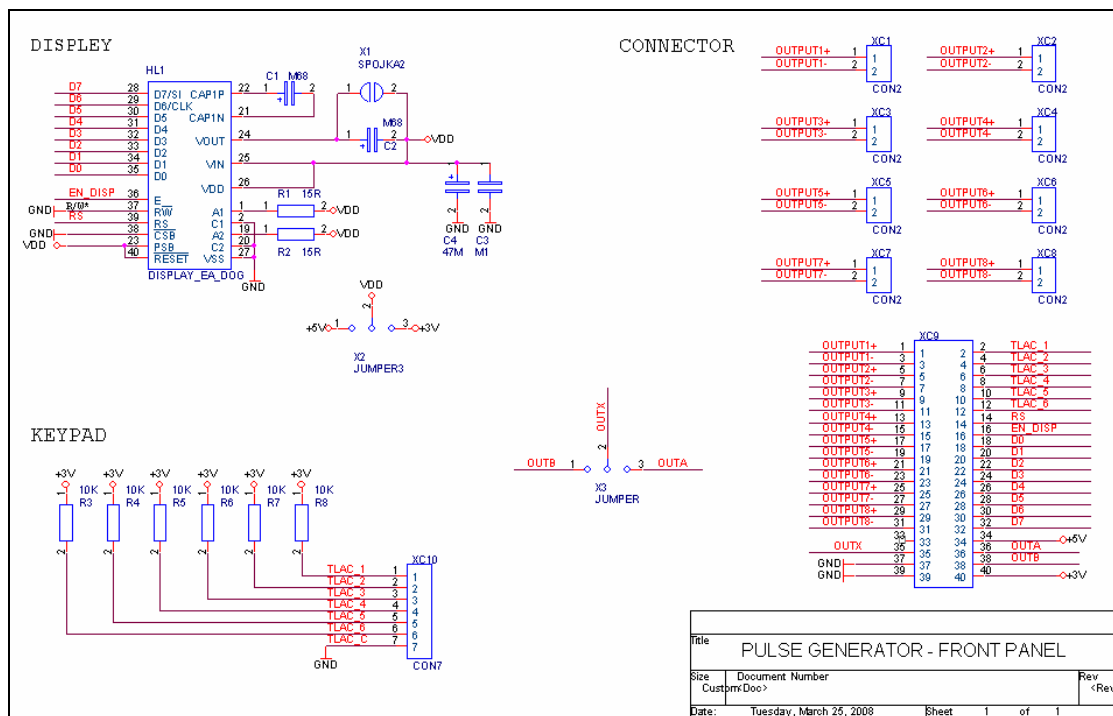
- [15] Vedral, J., Fischer, J.: *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02966-2
- [16] Wikipedia.org. *Joint Test Action Group* [online] 3.4.2008, [cit. 21. 4. 2008]
URL: <<http://en.wikipedia.org/wiki/JTAG>>
- [17] Záhlava, V.: *OrCAD 10*. 1.vyd., Praha 2004: Grada Publishing. 224 stran.
Průvodce. Obsahuje bibliografii a rejstřík. ISBN 80-247-0904-X.

Obsah přiloženého CD

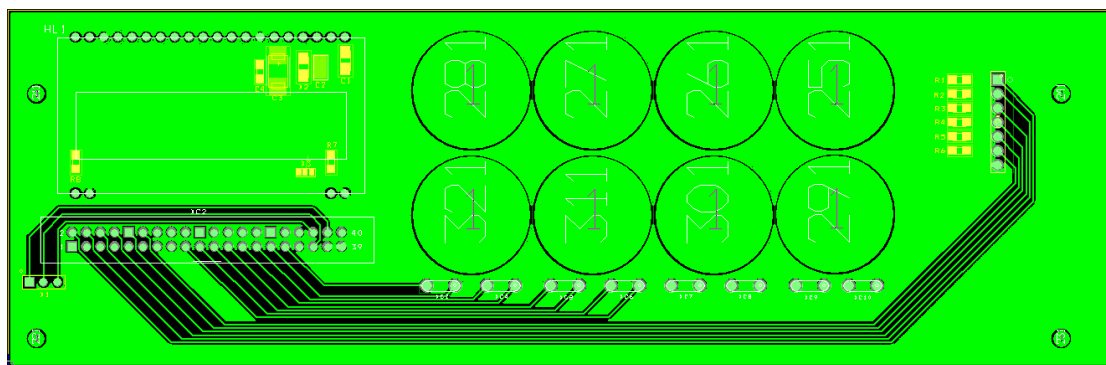
- Text bakalářské práce ve formátech PDF a DOC
- Schémata elektronických obvodů a návrh DPS z OrCADu
- Osazovací schéma Mainbordu a Output modulu ve formátu PDF
- Kusovník ve formátu DOC
- Výkres čelního a zadního krycího panelu ve formátech PDF a DWB
- Použitá literatura a texty v elektronické podobě
- Vývojové diagramy
- Zdrojový kód
- FLASH Programming DLL & Utilities

Přílohy

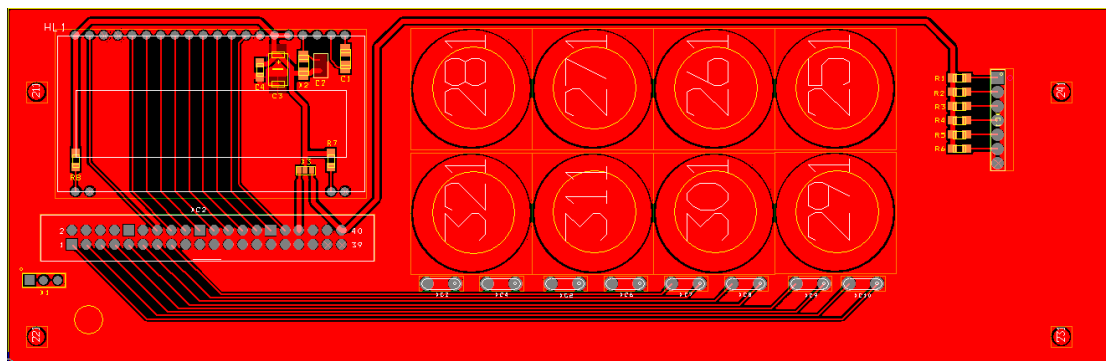
A. Front Panel – schéma a deska plošného spoje



Obr. A.1: Schéma předního panelu

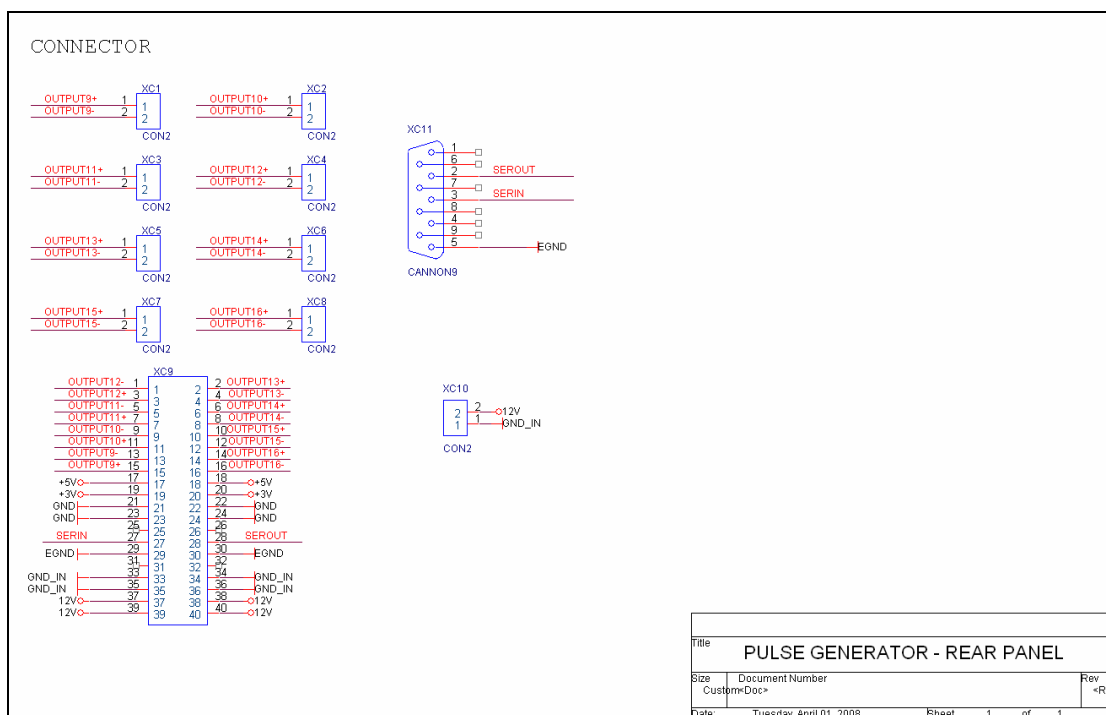


Obr. A.2: Vrchní strana DPS předního panelu

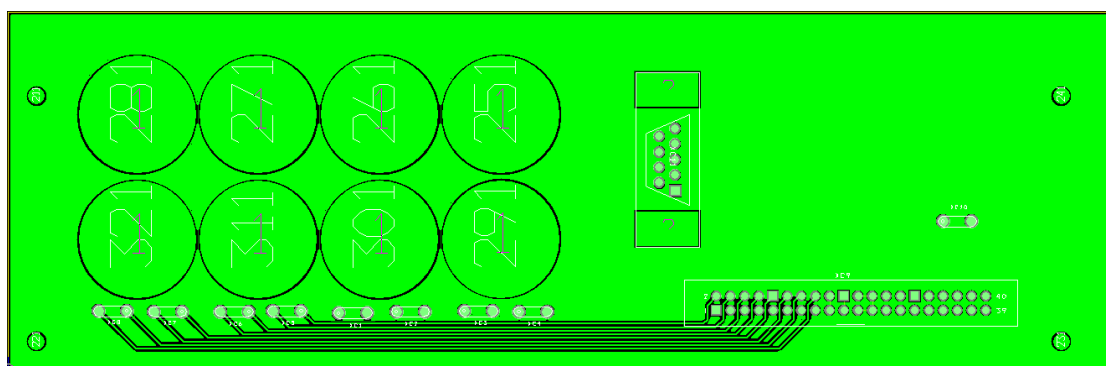


Obr. A.3: Spodní strana DPS předního panelu

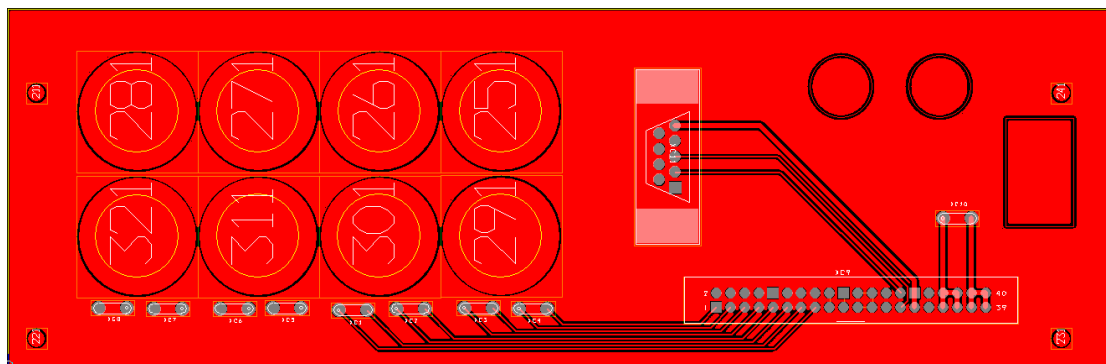
B. Rear Panel – schéma a deska plošného spoje



Obr. B.1: Schéma zadního panelu

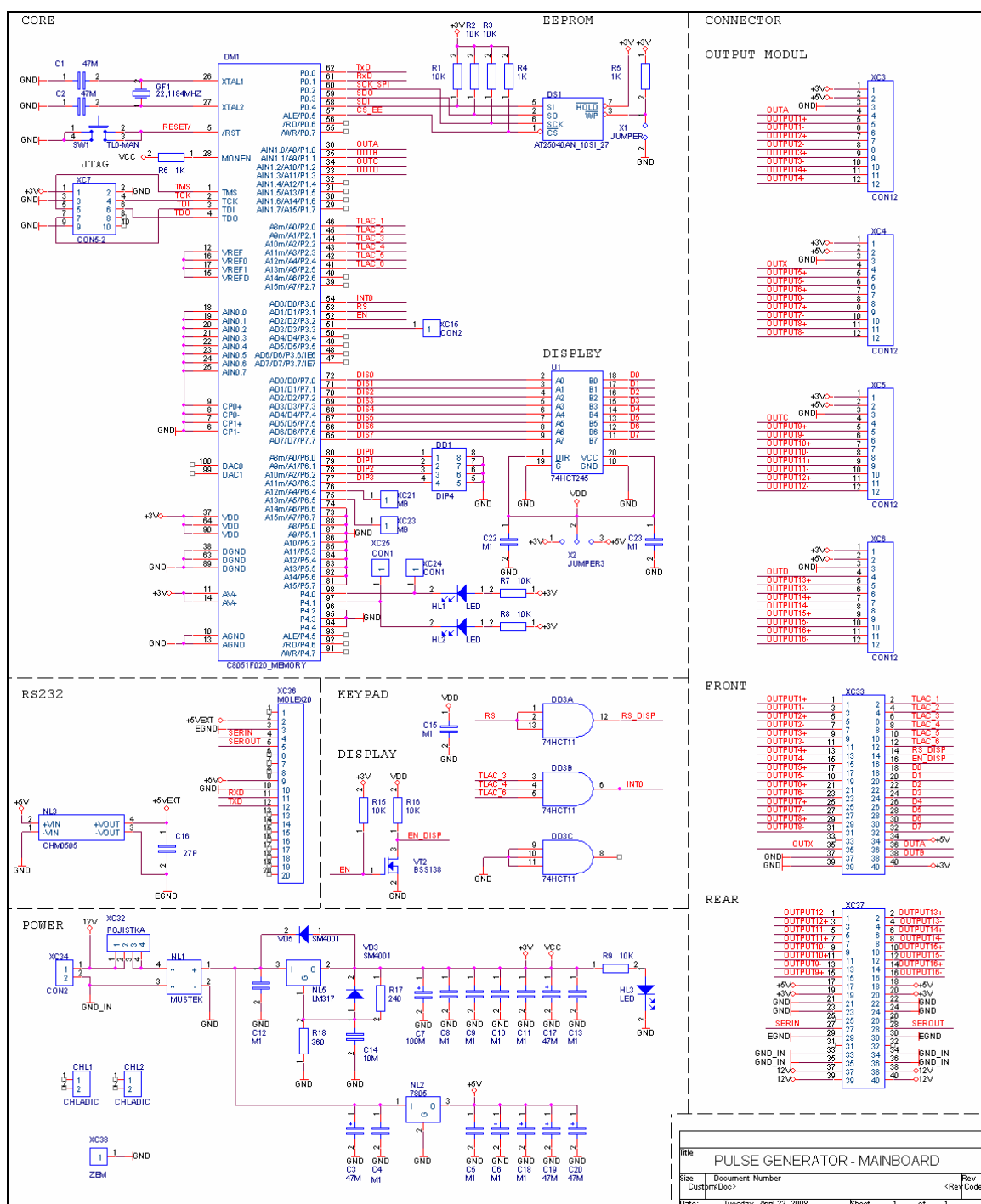


Obr. B.2: Vrchní strana DPS zadního panelu

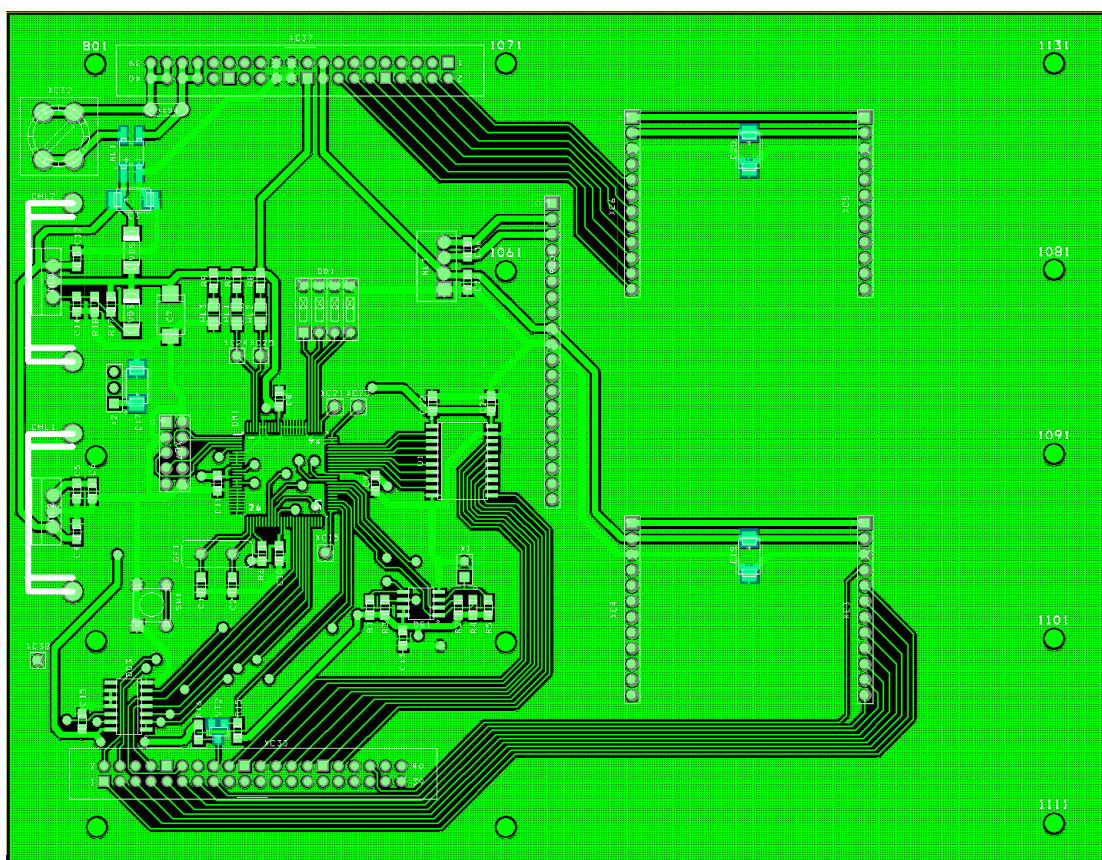


Obr. B.3: Spodní strana DPS zadního panelu

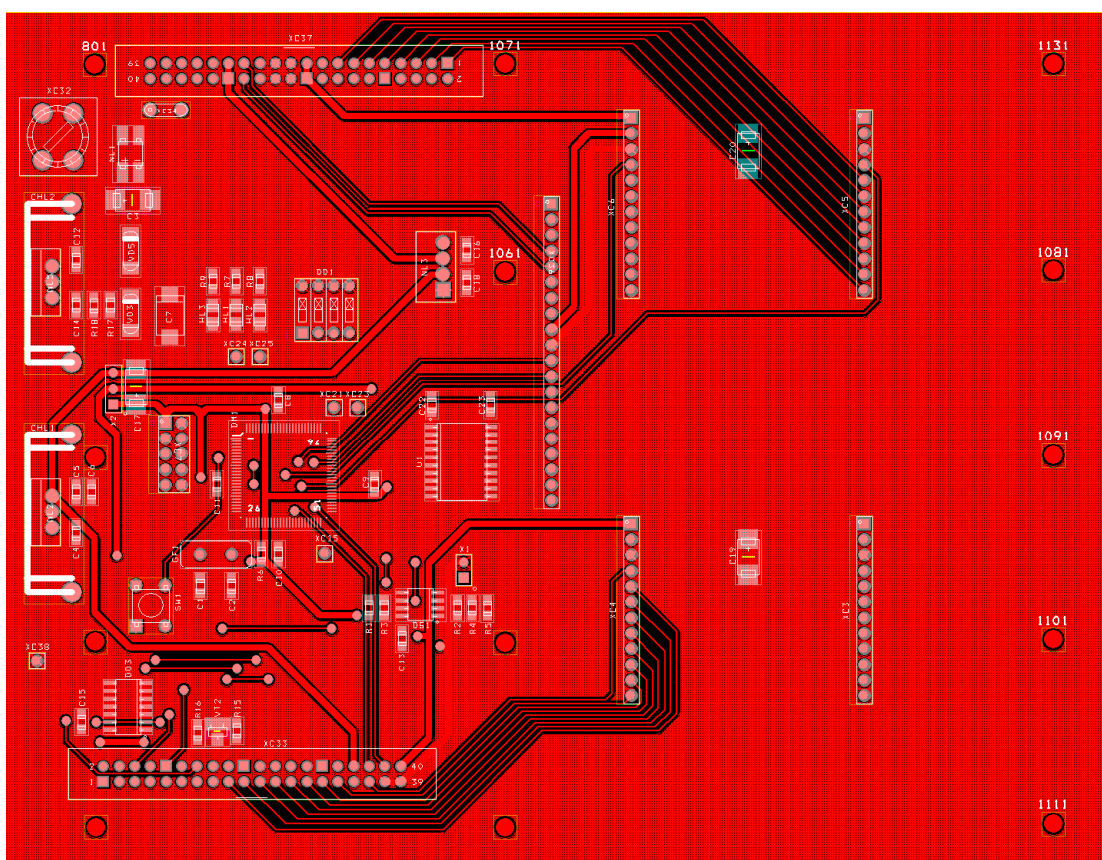
C. Mainboard – schéma a deska plošného spoje



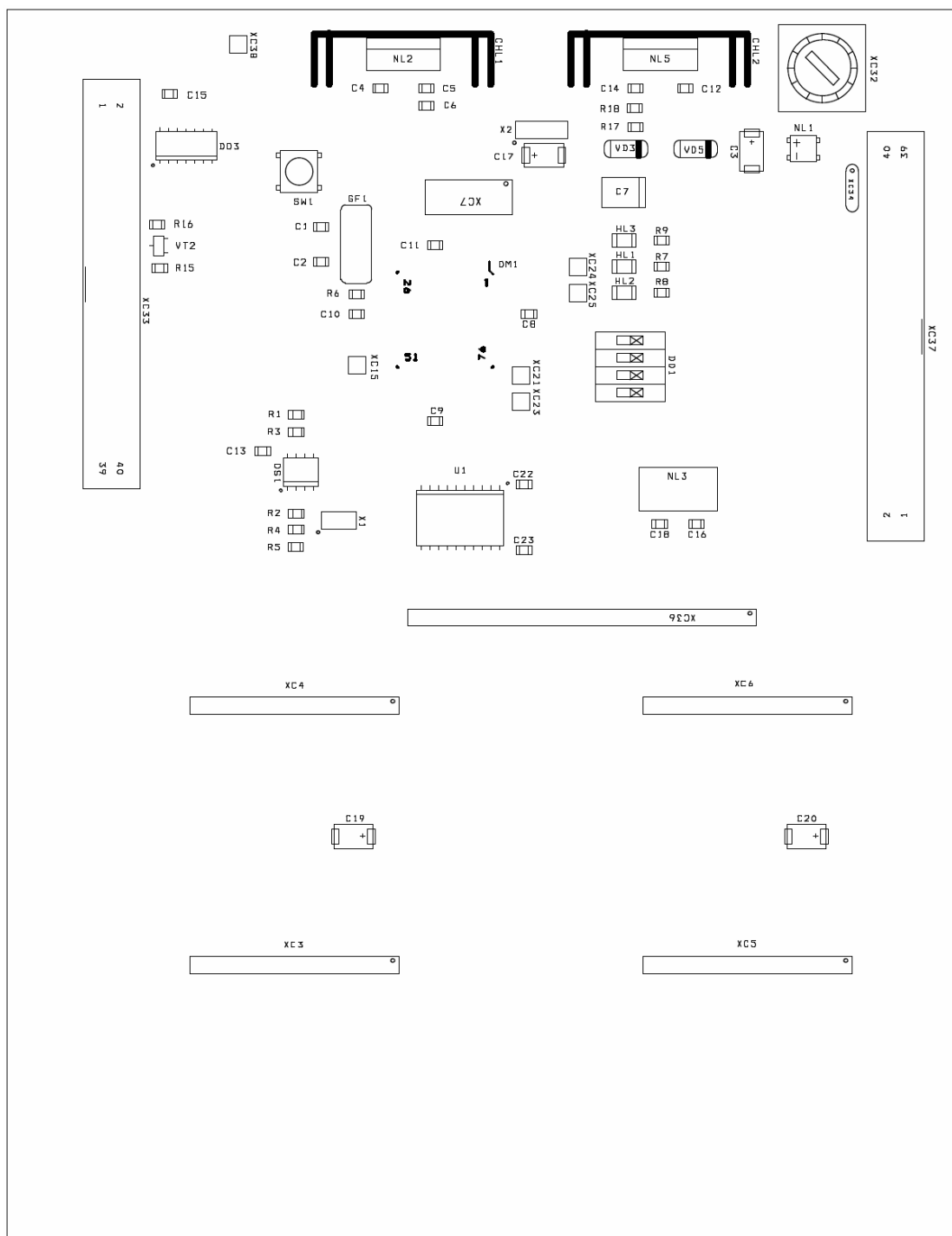
Obr. C.1: Schéma mainbordů



Obr. C.2: Vrchní strana DPS mainbordu

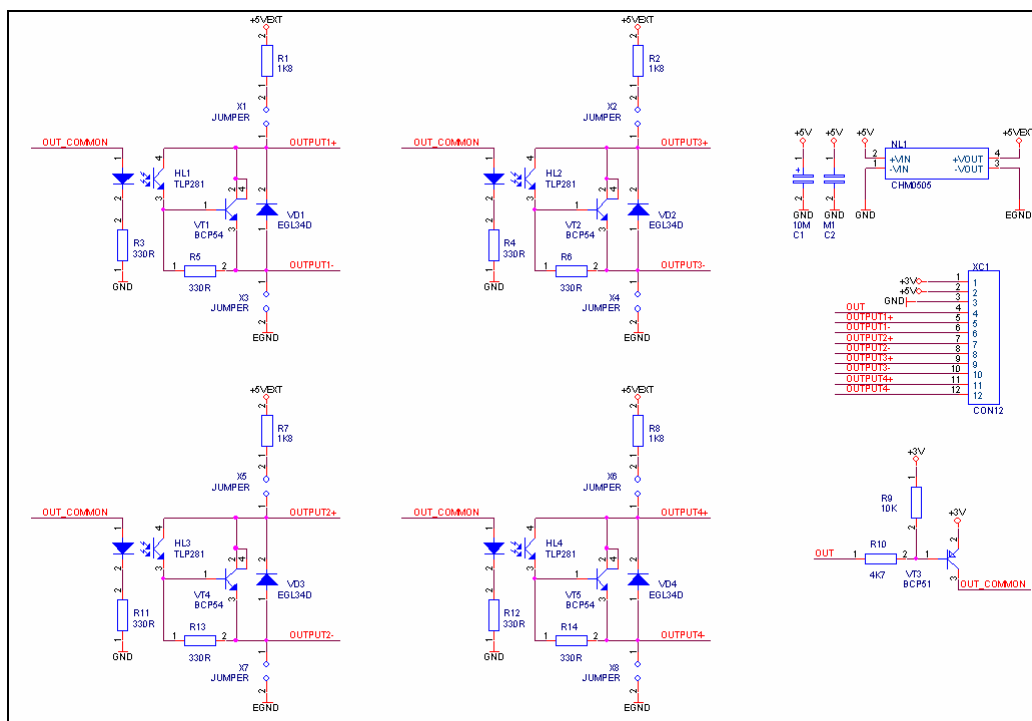


Obr. C.3: Spodní strana DPS mainbordu

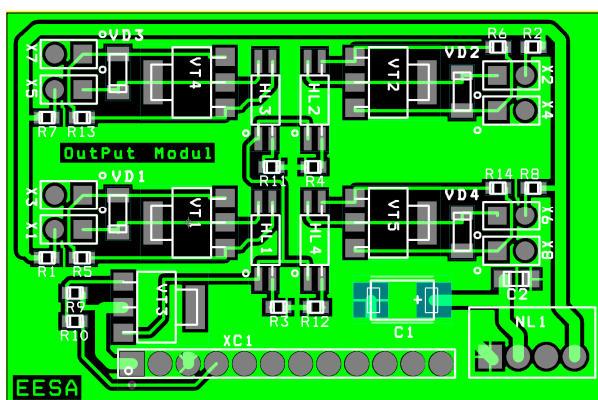


Obr. C.4: Osazovací schéma mainbordu

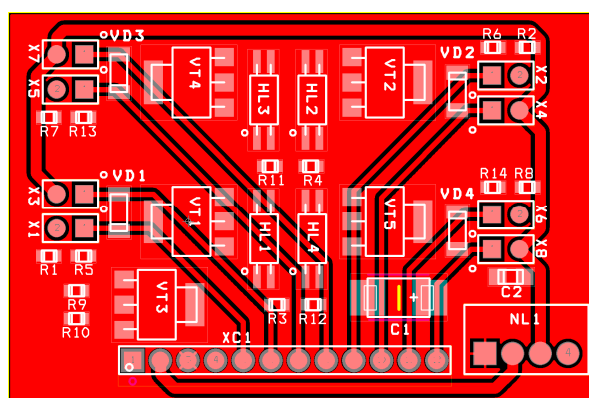
D. Output modul – schéma a deska plošného spoje



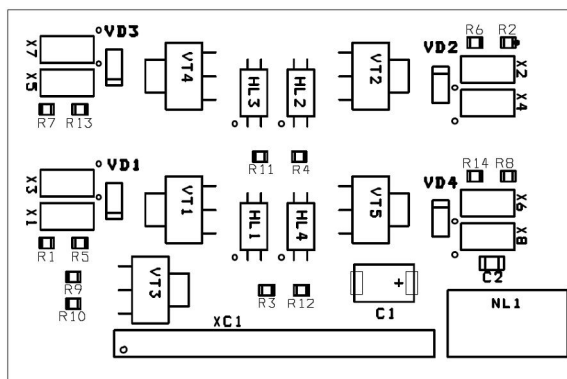
Obr. D.1: Schéma výstupního modulu



Obr. D.2: Vrchní strana DPS výstupního modulu



Obr. D.3: Spodní strana DPS výstupního modulu



Obr. D.4: Osazovací schéma výstupního modulu

E. Kusovník

KALINKA – FRONT PANEL

Počet	Označení	Typ	Pouzdro
2	C1, C2	M68	0805_1206
1	C3	M1	0805
1	C4	47M	TANTAL_C
1	HL1	DISPLAY_EA_DOG	Disp_EA_DOG
2	R1, R2	15R	0805
6	R3, R4, R5, R6, R7, R8	10K	0805
8	XC1, XC2, XC3, XC4, XC5, XC6, XC7, XC8	CON2	CON5MM_2
1	XC9	MLW-40 SPG-1	38786
1	XC10	CON7	J7-1
1	X1	SPOJKA2	SPOJKA2
1	X2	JUMPER3	SPOJKA3_MALA
1	X3	JUMPER	J3-1

KALINKA – REAR PANEL

Počet	Označení	Typ	Pouzdro
9	XC1, XC2, XC3, XC4, XC5, XC6, XC7, XC8, XC10	CON2	CON5MM_2
1	XC9	CON20-2	
1	XC11	WALCON.100/VH/TM2OE/W.325/40 CANNON9	

KALINKA – MAINBOARD

Počet	Označení	Typ	Pouzdro
2	CHL1, CHL2	CHLADIC	CHLADIC z MP400Z
2	C1, C2	27P	0805
4	C3, C17, C19, C20	10M	TANTAL_C
13	C4, C5, C6, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C15, C18, C22, C23	M1	0805
1	C7	100M	TANTAL_D
1	C14	10M	0805
1	C16	27P	0805
1	DD1	DIP4	SW4
1	DD3	74HCT11	SO14
1	DM1	C8051F020_MEMORY	QUAD.50M/100/WG16.00
1	DS1	AT25040AN_10SI_27	SO8
1	GF1	22,1184MHZ	KRYSTALV
3	HL1, HL2, HL3	LED	0805_1206
1	NL1	MUSTEK	MUSTEK_SMD
1	NL2	7805	TO220
1	NL3	CHM0505	TME0505
1	NL5	LM317	TO220
8	R1, R2, R3, R7, R8, R9, R15, R16	10K	0805

3	R4,R5,R6	1K	0805
1	R17	240	0805
1	R18	360	0805
1	SW1	TL6-MAN	TL4
1	U1	74HCT245	SOL20
2	VD3,VD5	SM4001	MELF
1	VT2	BSS138	SOT23
4	XC3,XC4,XC5,XC6	CON12	J12-1
1	XC7	MLW-10 SPG-1	38780
1	XC15	CON2	J1-1
2	XC21,XC23	MB	J1-1
2	XC24,XC25	CON1	J1-1
1	XC32	POJISTKA	POJ_STOJAK
4	XC33,XC37	MLW-40 SPG-1	38786
1	XC34	CON2	CON5MM_2
1	XC36	MOLEX20	J20-1
1	XC38	ZEM	J1-1
1	X1	JUMPER	J2-1
1	X2	JUMPER3	J3-1

KALINKA – OUTPUT MODUL

Počet	Označení	Typ	Pouzdro
1	C1	10M	TANTAL_C
1	C2	M1	0805
4	HL1,HL2,HL3,HL4	TLP281	TLP281
1	NL1	CHM0505	TME0505
4	R1,R2,R7,R8	1K8	0603
8	R3,R4,R5,R6,R11,R12,R13, R14	330R	0603
1	R9	10K	0603
1	R10	4K7	0603
4	VD1,VD2,VD3,VD4	EGL34D	MINIMELF
4	VT1,VT2,VT4,VT5	BCP54	SOT223
1	VT3	BCP51	SOT223
1	XC1	CON12	J12-1
8	X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8	JUMPER	J2-1